

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**INFLUENCIA DE PASADAS SUCESIVAS EN EL
MECANIZADO DEL INCONEL 718**

AUTOR: Marta Potti Huerta

TUTOR: Ana Muñoz Sánchez

Leganés, 25 de septiembre de 2017

RESUMEN

Este proyecto se centra en el análisis a través de un modelo numérico de la influencia de algunos de los parámetros de corte fundamentales en un proceso de corte ortogonal del material Inconel 718. Los parámetros estudiados son la velocidad de corte y el avance durante la primera y la segunda pasada del modelo numérico. Este proyecto se centra en la simulación de la segunda pasada del mecanizado porque los datos obtenidos a través de nuestro modelo numérico representan un modelo de mecanizado real, contrariamente a la primera pasada.

El Inconel 718 es un material utilizado principalmente en la industria aeronáutica debido a su alta resistencia a altas temperaturas. Actualmente, existen ciertas carencias sobre el conocimiento de su mecanizado y es por ello por lo que su estudio resulta de elevada importancia.

Para llevar a cabo este análisis se ha empleado el método de elementos finitos por medio del software Abaqus/Explicit. Una vez analizada la morfología de la viruta obtenida durante la primera y la segunda pasada del proceso mediante la variación de la velocidad de corte y el avance, se validó el modelo numérico a través de los resultados experimentales de la literatura.

Los resultados obtenidos mediante estos análisis pueden ser aplicados a la mejora de los procesos de mecanizado del Inconel 718, ya que la viruta influye en las características de la pieza obtenida tras el proceso de corte. Además, la implementación de un modelo numérico para el análisis de algunos parámetros esenciales del proceso de corte supone un ahorro de tiempo, dinero y recursos para la industria.

Palabras clave: Inconel 718, mecanizado, viruta, modelo de elementos finitos (MEF).

ABSTRACT

This project focuses on the analysis through a numerical model of the influence of some of the fundamental cutting parameters in an orthogonal cutting process of the Inconel 718 material. The parameters studied are the cutting speed and the feed rate during the first and the second pass of the numerical model. This project focuses on the simulation of the second pass of the machining because the data obtained with it through our numerical model do represent a real machining model, contrary to the first pass.

The Inconel 718 is a material used mainly in the aeronautical industry due to its high resistance to high temperatures. Currently, there are certain shortcomings on the knowledge of its machining and that is why its study is of great importance.

To carry out this analysis, the finite element method has been used using the Abaqus/Explicit software. Once the morphology of the chip obtained during the first and second passes of the process was analyzed by varying the cutting speed and the feed rate, the numerical model was validated through the experimental results of the literature.

The results obtained by these analyses can be applied to the improvement of the machining processes of the Inconel 718, since the chip influences the characteristics of the piece obtained after the cutting process. In addition, the implementation of a numerical model for the analysis of some essential parameters of the cutting process saves time, money and resources to the industry.

Key words: Inconel 718, machining, chip, finite element model (FEM).

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Introducción y objetivos.	1
1.2. Estructura del proyecto.	2
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. Material Inconel 718.	3
2.1.1. Superalaleaciones.	3
2.1.2. Superalaleaciones en base níquel.	3
2.1.3. Inconel 718.	4
2.2. Teoría de mecanizado.	6
2.2.1. Procesos de mecanizado.	6
2.2.2. Movimientos en el mecanizado.	9
2.2.3. Parámetros de corte.	9
2.2.4. Corte ortogonal.	11
2.3. Formación de viruta.	16
2.3.1. Tipos de viruta producida durante el mecanizado.	17
2.3.2. Zonas de deformación.	20
2.4. Marco regulador.	22
2.5. Impacto socio-económico.	23
CAPÍTULO III: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	24
3.1. Introducción.	24
3.2. Descripción del modelo numérico.	26
3.3. Materiales.	26
3.4. Características geométricas y condiciones de contorno.	27

3.5. Características del mallado.	28
3.6. Ecuación constitutiva. Johnson-Cook.	29
3.7. Criterio de rotura.	31
3.8. Condiciones de fricción.	32
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.	33
4.1. Análisis de resultados.	33
4.1.1. <i>Influencia de la velocidad de corte.</i>	36
4.1.2. <i>Influencia del avance.</i>	43
4.1.3. <i>Influencia del número de pasadas.</i>	51
4.1.4. <i>Conclusiones.</i>	60
4.2. Análisis de la morfología de viruta.	61
4.2.1. <i>Dimensiones de viruta analizadas.</i>	62
4.2.2. <i>Ensayos experimentales.</i>	67
4.2.3. <i>Pico ($t+$).</i>	74
4.2.4. <i>Valle ($t-$).</i>	77
4.2.5. <i>Ancho de segmento (w).</i>	80
4.2.6. <i>Ángulo de cizalladura (α).</i>	83
CAPÍTULO V: ORGANIZACIÓN Y PRESUPUESTO.	87
5.1. Organización.	87
5.2. Presupuesto del proyecto.	87
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.	89
6.1. Conclusiones.	89
6.2. Líneas de trabajo futuro.	90
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema del proceso de torneado o cilindrado.	7
Figura 2 - Esquema del proceso de fresado.	8
Figura 3 - Esquema del proceso de taladrado.	8
Figura 4 - Parámetros de corte en un corte ortogonal.	11
Figura 5 – Esquema de los parámetros geométricos del corte ortogonal.	12
Figura 6 – Esquema de las magnitudes angulares del corte ortogonal.	13
Figura 7 - Esquema de fuerzas actuantes durante un proceso de arranque de viruta.	15
Figura 8 - Proceso de formación de viruta.	16
Figura 9 - a) Viruta discontinua; b) Viruta segmentada; c) Viruta continua.	17
Figura 10 – Viruta continua.	18
Figura 11 – Viruta discontinua.	19
Figura 12 – Viruta serrada o no homogénea.	20
Figura 13 - Formación de filo recrecido durante mecanizado.	21
Figura 14 – Esquema de las zonas de deformación.	22
Figura 15 – Esquema de características geométricas de la herramienta de corte.	26
Figura 16 – Partes que componen el modelo numérico.	27
Figura 17 – Características geométricas y condiciones de contorno del modelo.	28
Figura 18 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 90 m/min.	36
Figura 19 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 120 m/min.	36
Figura 20 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 180 m/min.	37
Figura 21 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 240 m/min.	37
Figura 22 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 60 m/min.	38
Figura 23 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 90 m/min.	38
Figura 24 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 120 m/min.	38

Figura 25 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 180 m/min.	39
Figura 26 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 240 m/min.	39
Figura 27 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 60 m/min.	40
Figura 28 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 90 m/min.	40
Figura 29 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 120 m/min.	40
Figura 30 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 180 m/min.	41
Figura 31 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 240 m/min.	41
Figura 32 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 60 m/min y un avance de 0,10 mm.	43
Figura 33 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 60 m/min y un avance de 0,15 mm.	43
Figura 34 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 0,05 mm.	44
Figura 35 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 0,10 mm.	44
Figura 36 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 0,15 mm.	45
Figura 37 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,05 mm.	46
Figura 38 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,10 mm.	46
Figura 39 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,15 mm.	46
Figura 40 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 180 m/min y un avance de 0,05 mm.	47
Figura 41 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 180 m/min y un avance de 0,10 mm.	47

Figura 42 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 180 m/min y un avance de 0,15 mm.	48
Figura 43 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 240 m/min y un avance de 0,05 mm.	48
Figura 44 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 240 m/min y un avance de 0,10 mm.	49
Figura 45 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 240 m/min y un avance de 0,15 mm.	49
Figura 46 – Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 90$ m/min, 2ª pasada.	53
Figura 47 – Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 120$ m/min, 2ª pasada.	54
Figura 48 - Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 180$ m/min, 2ª pasada.	54
Figura 49 – Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 240$ m/min, 2ª pasada.	55
Figura 50 – Discontinuidad del caso de avance = 0,10 mm, $V_c = 60$ m/min, 2ª pasada.	55
Figura 51 – Discontinuidad del caso de avance = 0,10 mm, $V_c = 120$ m/min, 2ª pasada.	56
Figura 52 – Discontinuidad del caso de avance = 0,10 mm, $V_c = 240$ m/min, 1ª pasada.	56
Figura 53 – Discontinuidad del caso de avance = 0,15 mm, $V_c = 180$ m/min, 2ª pasada.	57
Figura 54 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 60$ m/min.	58
Figura 55 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 90$ m/min.	58
Figura 56 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 120$ m/min.	58
Figura 57 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 180$ m/min.	59
Figura 58 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 240$ m/min.	59
Figura 59 – Esquema del corte ortogonal experimental realizado.	61
Figura 60 – Esquema general de las dimensiones de viruta.	62

Figura 61 – Pico.....	63
Figura 62 – Valle.	64
Figura 63 – Ancho de segmento.	65
Figura 64 – Ángulo de cizalladura.	66
Figura 65 – Torno de control numérico Smart-turn 6/260 de la Universidad Carlos III de Madrid.	67
Figura 66 – Muestras pre-ataque químico y post-ataque químico de los ensayos experimentales.	68
Figura 67 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 60 m/min.	69
Figura 68 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 90 m/min.	69
Figura 69 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 120 m/min.	69
Figura 70 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 240 m/min.	70
Figura 71 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 60 m/min.	70
Figura 72 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 90 m/min.	70
Figura 73 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 120 m/min.	71
Figura 74 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 180 m/min.	71
Figura 75 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 240 m/min.	71
Figura 76 - Continuidad del caso avance = 0,05 mm y $V_c = 90$ m/min.....	72
Figura 77 – Continuidad del caso avance = 0,10 mm y $V_c = 60$ m/min.	73
Figura 78 – Continuidad del caso avance = 0,15 mm y $V_c = 60$ m/min.	74
Figura 79 - Gráficas de valor de pico experimental y numérica para un avance de 50 μm	76
Figura 80 - Gráficas de valor de pico experimental y numérica para un avance de 100 μm	76

Figura 81 - Gráficas de valor de pico experimental y numérica para un avance de 150 μm .	76
Figura 82 - Gráficas de valor de valle experimental y numérica para un avance de 50 μm .	79
Figura 83 - Gráficas de valor de valle experimental y numérica para un avance de 100 μm .	79
Figura 84 - Gráficas de valor de valle experimental y numérica para un avance de 150 μm .	79
Figura 85 - Gráficas de valor ancho de segmento experimental y numérica para un avance 50 μm .	82
Figura 86 - Gráficas de valor ancho de segmento experimental y numérica para un avance 100 μm .	82
Figura 87 - Gráficas de valor ancho de segmento experimental y numérico para un avance 150 μm .	82
Figura 88 - Gráficas de valor ángulo de cizalladura experimental y numérica para avance 50 μm .	85
Figura 89 - Gráficas de valor ángulo de cizalladura experimental y numérica para avance 100 μm .	85
Figura 90 - Gráficas de valor ángulo de cizalladura experimental y numérica para avance 150 μm .	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Composición química límite, %.	5
Tabla 2 – Parámetros de corte empleados en las simulaciones.	25
Tabla 3 – Propiedades del material Inconel 718 utilizadas en el modelo numérico.	27
Tabla 4 – Tamaño de malla de las virutas y las interfases dependiendo del avance.	29
Tabla 5 – Parámetros de la ecuación de Johnson-Cook [10].	31
Tabla 6 - Temperatura máxima del modelo numérico para un avance de 0,10 mm en función de la velocidad de corte.	59
Tabla 7 – Resultados experimentales del valor de pico (t+).	74
Tabla 8 – Resultados numéricos del valor de pico (t+) de la segunda pasada de la simulación.	75
Tabla 9 - Porcentaje de error entre los valores de pico experimentales y numéricos.	75
Tabla 10 – Resultados experimentales del valor de valle (t-).	77
Tabla 11 – Resultados numéricos del valor de valle (t-) de la segunda pasada de la simulación.	78
Tabla 12 - Porcentaje de error entre los valores de valle experimentales y numéricos.	78
Tabla 13 – Resultados experimentales del valor de ancho de segmentos (w).	80
Tabla 14 – Resultados numéricos del valor de ancho de segmento (w) de la segunda pasada de la simulación.	81
Tabla 15 - Porcentaje de error entre los valores de ancho de segmento experimentales y numéricos.	81
Tabla 16 – Resultados experimentales del valor de ángulo de cizalladura (α).	83
Tabla 17 – Resultados numéricos del valor de ángulo de cizalladura (α) de la segunda pasada de la simulación.	84
Tabla 18 - Porcentaje de error entre los valores de ángulo de cizalladura experimentales y numéricos.	84
Tabla 19 - Relación entre tiempo invertido y tareas del proyecto.	87
Tabla 20 - Costes de personal.	88
Tabla 21 - Costes de material	88

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

1.1. Introducción y objetivos.

El sector industrial de la fabricación mecánica actualmente está en constante crecimiento y en la búsqueda de mejoras que introducir a sus procesos de producción. El mecanizado por arranque de viruta es uno de los procesos más empleados y es por ello por lo que su estudio es cada vez más importante para la industria.

El mecanizado es un proceso complejo en el que influyen diferentes variables, por lo que el estudio de la modelización numérica de estos procesos es importante para su correcta comprensión. La modelización numérica más comúnmente utilizada es a través del método de elementos finitos (MEF). A través de este tipo de procesos es posible obtener información acerca de algunos de los parámetros más importantes, como pueden ser las fuerzas de mecanizado, tensiones residuales, presiones, temperaturas, deformación y morfología tanto de la pieza mecanizada como de la herramienta empleada en dicho mecanizado. A su vez, el estudio a través de modelos numéricos genera un ahorro de tiempo, dinero y material para la industria.

Este proyecto se centra en el proceso de mecanizado de torneado del Inconel 718, ya que es uno de los procesos por arranque de viruta más comunes en la actualidad, así como el torno es una máquina básica en el proceso industrial de mecanizado.

El material del que está formada la pieza a mecanizar de nuestro estudio es el Inconel 718. Este material se emplea principalmente en la industria aeronáutica por su elevada resistencia a altas temperaturas, así como a la corrosión. Se trata de una superaleación en base níquel producida por Special Metals Corporation [1]. El mecanizado de este material presenta ciertas dificultades y actualmente existe un gran número de carencias en el conocimiento del mecanizado del Inconel 718. Es por ello por lo que se decidió centrar el proyecto en el estudio de este material.

En el análisis realizado por Mercè Seguí Salom [2] se estudió experimentalmente la influencia de los parámetros de corte (velocidad de corte y avance) sobre la morfología de viruta obtenida tras el proceso de torneado del Inconel 718. Este es uno de los casos

de estudio de este proyecto, a través de una simulación por el método de elementos finitos, así como el estudio de la influencia de la segunda pasada en dicho mecanizado.

Durante la realización de este proyecto se plantean dos objetivos principales:

1. Estudio y análisis de la influencia de los parámetros de corte en la morfología de la viruta, ya que este se considera un aspecto crucial para predecir la vida de la herramienta.
2. Análisis de la morfología de viruta obtenida durante el mecanizado del Inconel 718 a partir de un modelo numérico bidimensional de elementos finitos. La validación de los resultados obtenidos se realizará a partir de los datos experimentales recogidos en [2].

1.2. Estructura del proyecto.

Este Trabajo de Fin de Grado se ha dividido en los siguientes capítulos:

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN. Introducción y objetivos, además de una breve explicación de la estructura del proyecto.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE. Definición teórica del material objeto de este estudio -Inconel 718-, la teoría del mecanizado y el proceso de formación de viruta. Además, se añadirán dos capítulos adicionales que explicarán brevemente el marco regulador y el impacto socio-económico de los temas tratados.

CAPÍTULO III: MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS. Breve explicación teórica acerca de la modelización numérica y el método de elementos finitos. Explicación detallada del modelo numérico analizado.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS. Análisis de los resultados obtenidos acerca de la influencia de los diferentes parámetros de corte estudiados -fuerza de corte y avance- sobre la morfología de viruta. Análisis de la influencia de la segunda pasada. Validación del modelo numérico a través de los datos experimentales obtenidos del Proyecto de Mercè Seguí Salom [2].

CAPÍTULO V: ORGANIZACIÓN Y PRESUPUESTO. Organización de las tareas principales desarrolladas en este proyecto. Estimación de costes.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.

2.1. Material Inconel 718.

2.1.1. *Superalaciones.*

En la década de 1930, las superaleaciones surgieron de la necesidad de obtener un material con mejores prestaciones mecánicas a altas temperaturas en la industria aeroespacial, para el desarrollo de turbocompresores y turbinas de motores de aviones.

Las superaleaciones son aleaciones que se caracterizan por una excelente fuerza mecánica y resistencia al deslizamiento a altas temperaturas, así como por su estabilidad en la superficie y su resistencia a la fluencia, la corrosión y la oxidación.

Actualmente, el campo de aplicación de estos materiales ha aumentado, extendiéndose su uso a plantas químicas, turbinas de gas o reactores nucleares. Debido a sus buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas, se ha alcanzado una notable mejora en la eficiencia de los motores a reacción y en las turbinas de gas, ya que esta estará directamente relacionada con las temperaturas máximas que pueden alcanzar.

Este tipo de aleaciones se pueden clasificar en tres grandes grupos dependiendo de su composición química: superaleaciones base níquel, superaleaciones base hierro y superaleaciones base cobalto.

2.1.2. *Superalaciones en base níquel.*

El Níquel supondrá la formación de una estructura austenítica gamma cúbica centrada en las caras, lo que le conferirá al material una buena resistencia a altas temperaturas, a corrosión y a fluencia.

La composición química de esta aleación, entre los más de 10 elementos que la componen, se basa principalmente en un 70% de Níquel, un 10-12% de Cromo, hasta un 8% de Aluminio y entre un 1-2% de Titanio.

2.1.3. Inconel 718.

El Inconel 718 se trata de una marca producida por Special Metals Corporation, la cual se refiere a un grupo de superaleaciones de base níquel-cromo endurecibles por precipitación. Esta familia fue creada en 1959 por equipos de investigación de la compañía International Nickel (INCO), pero hasta 1965 no comenzó su uso industrial.

El Inconel 718 se trata de una aleación níquel-cromo cuyas características más destacables son:

- Alta resistencia a la rotura hasta temperaturas de 700 °C, ya que su límite elástico es elevado y se mantiene hasta esta temperatura.
- Buenas propiedades mecánicas y químicas a elevadas temperaturas.
- Buena resistencia a tracción y fatiga a temperaturas moderadas.
- Resistente a corrosión y oxidación.
- Buenas características de soldadura, especialmente su resistencia a la rotura tras el soldado.

El Inconel 718 puede ser fabricado con facilidad y de una manera económica. Este hecho, combinado con la conservación de sus propiedades mecánicas hasta los 700 °C, hace que potencie su crecimiento en la industria de manera considerable. Uno de los problemas clave de este material es su mecanizado, el cual sigue siendo un reto incluso para los sectores más avanzados dedicados a la fabricación.

Este material se encuentra frecuentemente en ambientes extremos, donde la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas son muy importantes para obtener un buen resultado final. Por ello, estas aleaciones son principalmente utilizadas en la industria aeroespacial, en elementos como las turbinas de gas, motores de cohetes, vehículos espaciales, y en la fabricación de componentes de turborreactores [3]. La composición química del Inconel 718 se encuentra en la Tabla 1 [1].

Tabla 1 – Composición química límite, %.

Níquel (+ Cobalto)	50.00 – 55.00
Cromo	17.00 – 21.00
Hierro	Balance
Niobio	4.75 – 5.50
Molibdeno	2.80 – 3.30
Titanio	0.65 – 1.15
Aluminio	0.20 – 0.80
Cobalto	1.00
Manganeso	0.35
Silicio	0.35
Fósforo	0.015
Sulfuro	0.015
Boro	0.006
Cobre	0.30
Carbono	0.08

Propiedades del Inconel 718.

A continuación, se enumeran las propiedades fundamentales del Inconel 718. Los parámetros correspondientes a las propiedades indicadas fueron obtenidos a través de la fuente [4].

- **Propiedades físicas:**

Densidad: $\rho = 8,19 \text{ g/cm}^3$

- **Propiedades térmicas:**

Coefficiente de expansión térmica: $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Conductividad térmica: $K = 11,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Calor específico: $C = 435 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Punto de fusión: $T_{\text{fusión}} = 1260\text{-}1336 \text{ }^\circ\text{C}$

- **Propiedades mecánicas:**

Módulo de elasticidad: $E = 200 \text{ GPa}$

Coefficiente de Poisson: $\nu = 0,3$

Módulo de rigidez: $G = 77 \text{ GPa}$

2.2. Teoría de mecanizado.

El mecanizado es un proceso de fabricación consistente en la eliminación de material por arranque de viruta o por abrasión. Se realiza a partir de una pieza inicial que suele tratarse de un producto semielaborado como barras o tochos y, mediante un conjunto de operaciones, se modificará la forma y tamaño de la materia prima hasta obtener las especificaciones requeridas por el diseño.

En las simulaciones realizadas se ha llevado a cabo un mecanizado por arranque de viruta. Se trata de un proceso mediante el cual el material es arrancado de la pieza base mediante la incidencia del filo de la herramienta, el cual se desplazará con una velocidad relativa por el interior de la pieza. Para conseguir la penetración de la herramienta, la dureza de esta deberá ser mayor que la de la pieza. Este proceso dará lugar a un material residual con forma laminar denominado viruta. Se pueden diferenciar dos fases principales en el proceso de mecanizado por arranque de viruta: desbaste, para indicar el conjunto de operaciones de transformación sucesivas que aproximan la preforma hasta la pieza final, y acabado, última operación de transformación cuyo fin es la mejora de la calidad superficial.

El mecanizado en la actualidad es uno de los procesos de fabricación más extendidos y utilizados en la industria. Algunas de sus ventajas fundamentales son:

- Precisión dimensional.
- Acabado superficial superior a otros procesos de fabricación.
- Capacidad de obtención de geometrías complejas.

Por otro lado, el desperdicio de materia prima y el incremento del tiempo de mecanizado con respecto a otros procesos de fabricación suponen algunas de sus desventajas fundamentales [5].

2.2.1. Procesos de mecanizado.

Un proceso de mecanizado requiere la utilización de los siguientes tres elementos fundamentales:

- **Pieza.** Se denomina pieza al elemento material sometido a una serie de procesos de mecanizado con el fin de alcanzar su geometría final a partir de la preforma inicial. La pieza final deberá cumplir tanto las especificaciones geométricas como las especificaciones mecánicas del diseño.
- **Herramienta.** Se trata del instrumento de corte empleado para el arranque de material de la pieza durante el mecanizado. La herramienta de corte suele estar formada por una o varias aristas de corte.
- **Máquina-Herramienta.** Conjuntos de elementos necesarios para asegurar el movimiento relativo entre la pieza y la herramienta.

Existen tres procesos de mecanizado fundamentales clasificados según el movimiento relativo herramienta-pieza.

- **TORNEADO O CILINDRADO:** se utiliza para piezas de revolución simétricas axialmente. Combina el movimiento de giro de la pieza a mecanizar con el desplazamiento lineal en un movimiento de avance de la herramienta de corte de un solo filo.

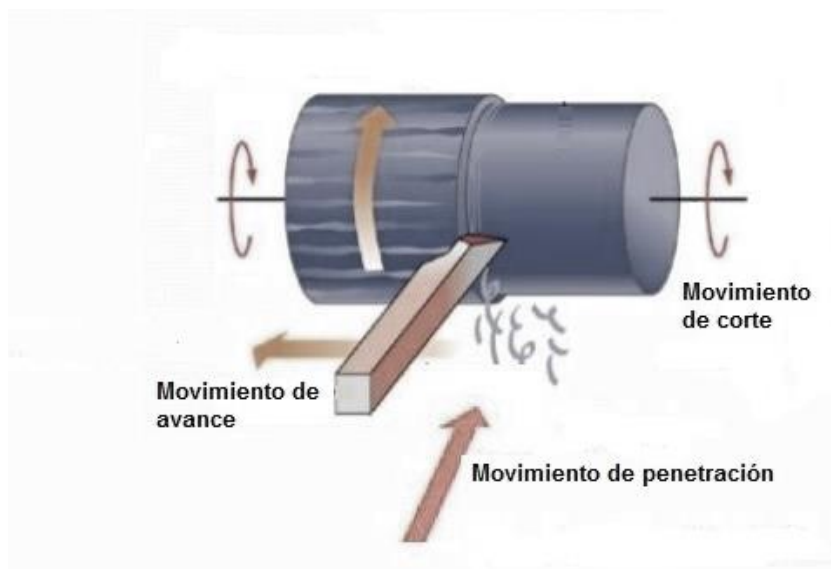


Figura 1 - Esquema del proceso de torneado o cilindrado.

- **FRESADO:** mecanizado por arranque de material mediante el giro de la herramienta de corte rotativa de varios filos, combinado con los movimientos longitudinales de la pieza.

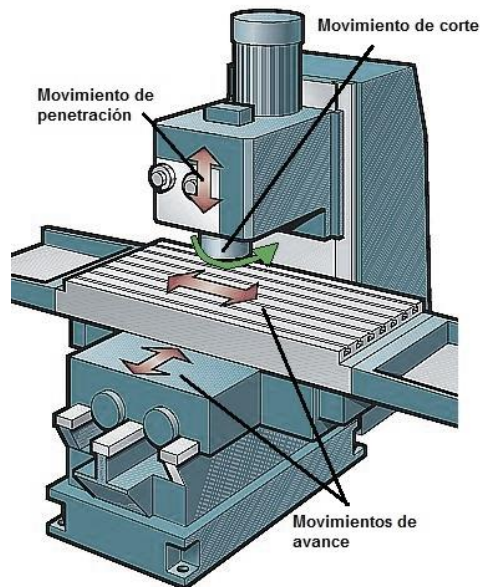


Figura 2 - Esquema del proceso de fresado.

- **TALADRADO:** combina el movimiento de rotación de la herramienta respecto a su eje con el movimiento lineal de avance en la dirección de su eje. Habitualmente sirve para obtener agujeros cilíndricos en la pieza mecanizada, así como para operaciones de roscado y acabado.

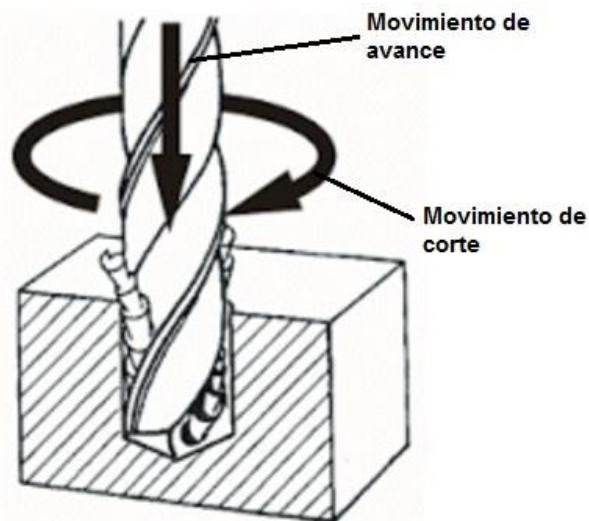


Figura 3 - Esquema del proceso de taladrado.

2.2.2. Movimientos en el mecanizado.

- **MOVIMIENTO DE CORTE:** movimiento mediante el cual sólo se arranca viruta durante una revolución o durante una carrera.
- **MOVIMIENTO DE AVANCE:** es el que, combinado con el de corte, permite el arranque de viruta continuo.
- **MOVIMIENTO DE PENETRACIÓN:** indica la profundidad del mecanizado, lo que también indicará el espesor de la viruta.
- **MOVIMIENTO DE APROXIMACIÓN:** conjunto de movimientos que realiza la herramienta hasta su posicionamiento exacto antes del inicio del corte. Durante este movimiento no se arranca material.

2.2.3. Parámetros de corte.

Los parámetros de corte son magnitudes tecnológicas necesarias para definir los movimientos básicos de un proceso de mecanizado óptimo.

VELOCIDAD DE CORTE

Velocidad lineal relativa entre la herramienta y la pieza con dirección perpendicular al filo de la herramienta, generalmente indicada en m/min.

$$V_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{1000} \quad (1)$$

Siendo en la Ecuación 1:

V_c : velocidad de corte expresada en m/min.

n : velocidad angular de la pieza expresada en rpm.

D : diámetro de la pieza mecanizada expresado en mm.

Se trata de un parámetro de corte de gran importancia, el cual dependerá del material que se desea mecanizar, así como de la geometría de la herramienta. Su elección es importante para el mecanizado ya que, si su valor es demasiado alto, aumentará el desgaste en la herramienta y, por lo tanto, los costes y tiempos de mecanizado mientras que, si es demasiado bajo, se reducirá la producción.

VELOCIDAD DE AVANCE

El avance es el desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza mecanizada por cada revolución de la pieza. La velocidad de avance (mm/min) se podrá calcular a partir de los datos del avance (mm) y la velocidad de giro (rpm).

$$V_a = a \cdot n \quad (2)$$

Siendo en la Ecuación 2:

V_a : velocidad de avance (mm/min).

a : avance (mm/rev).

n : velocidad angular de la pieza (rpm)

PROFUNDIDAD DE CORTE

La profundidad de corte es la distancia de la capa arrancada de la superficie de la pieza mecanizada en una pasada. Esta distancia va a ser igual al espesor de la viruta que se forme durante el mecanizado.

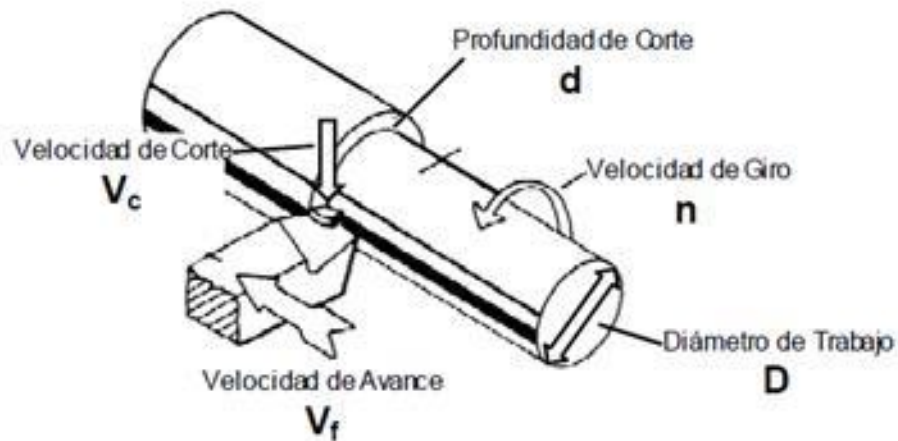


Figura 4 - Parámetros de corte en un corte ortogonal.

2.2.4. Corte ortogonal.

El corte ortogonal es un tipo de proceso de arranque de material en el que el filo de la herramienta se encuentra situado perpendicular a la dirección del movimiento de corte principal. Específicamente en el proceso de torneado, un corte ortogonal implica que el filo de la herramienta sea perpendicular a la dirección de la velocidad de corte, es decir, que el ángulo de inclinación sea igual a 90° . En el caso de que no fueran perpendiculares estas dos direcciones, se trataría de un corte oblicuo.

Aunque en la realidad el ángulo entre el filo y la dirección del movimiento no sea 90° , su desviación será generalmente inferior a 15° . Esta desviación se podrá despreciar y se supondrá un mecanizado de corte ortogonal.

2.2.4.1. Parámetros geométricos del corte ortogonal.

A continuación, se definen los parámetros geométricos fundamentales del corte ortogonal [6].

- **Filo:** arista cortante que penetra en el material.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.

- **Superficie de incidencia:** cara plana de la herramienta en contacto con la superficie de la pieza ya mecanizada.
- **Superficie de desprendimiento:** cara plana de la herramienta por la que desliza la viruta formada durante el mecanizado.

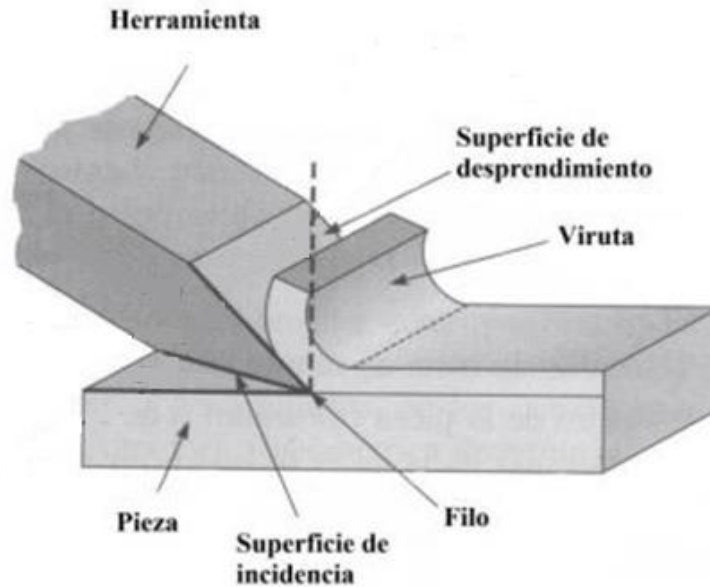


Figura 5 – Esquema de los parámetros geométricos del corte ortogonal.

Para definir los parámetros anteriores es necesario el conocimiento de las magnitudes angulares que intervienen en el proceso.

- **Ángulo de filo, β :** ángulo formado por las superficies de incidencia y desprendimiento de la herramienta. Este ángulo queda definido por la geometría de la plaquita utilizada.
- **Ángulo de incidencia u holgura, α :** ángulo formado por la superficie de incidencia de la herramienta y la superficie ya mecanizada de la pieza. La elección del valor de este ángulo depende del material de la pieza y de la herramienta. Toma habitualmente valores positivos comprendidos entre 5° y 10° . Al disminuir este ángulo, el contacto herramienta-pieza aumenta, aumentando la temperatura y

el desgaste de la herramienta. Si por el contrario este ángulo aumentara, se evitarían los problemas citados, pero se debilitaría el filo de la herramienta.

- **Ángulo de desprendimiento, γ :** ángulo formado por la superficie de desprendimiento de la herramienta y la perpendicular a la dirección de corte. Según el signo del valor de este ángulo, se diferencia entre geometría de corte positiva o negativa.

Al aumentar el ángulo de desprendimiento el rozamiento viruta-herramienta disminuye, y la herramienta penetrará de forma más eficiente en el material, obteniendo así un mejor acabado superficial. Si este ángulo disminuye, mejorará la resistencia de la herramienta, aunque aparecerán problemas de temperatura y energía consumida por la herramienta. Este ángulo suele tomar valores comprendidos entre -5° y 30° .

- **Ángulo de cizallamiento o deslizamiento, Ψ :** ángulo formado por la superficie por mecanizar y el plano de cizalladura, es decir, plano en el cual se produce deslizamiento entre los átomos del material de la pieza.

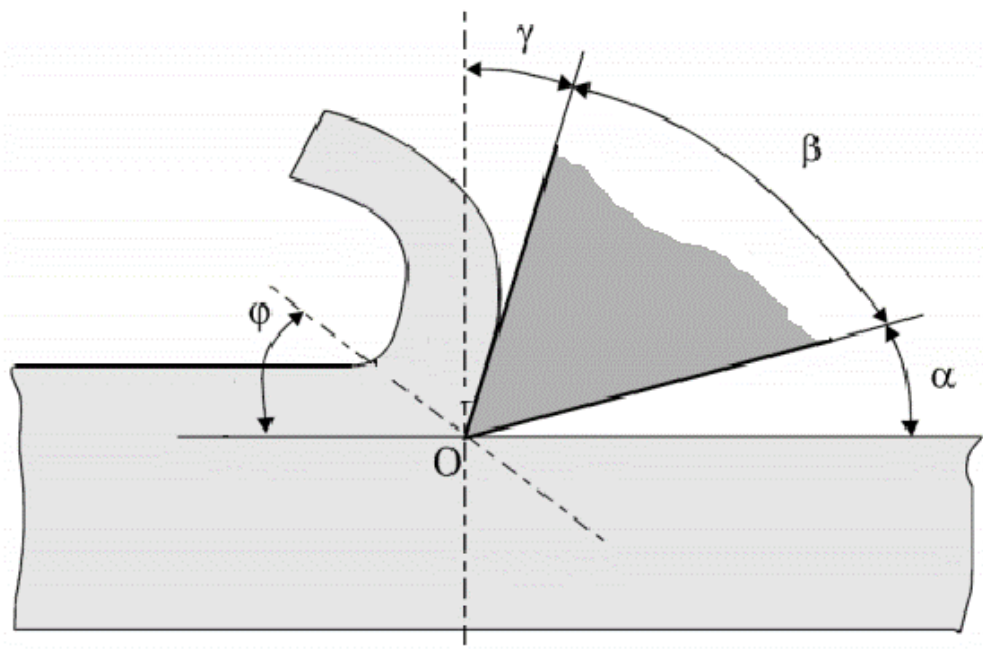


Figura 6 – Esquema de las magnitudes angulares del corte ortogonal.

2.2.4.2. *Fuerzas del corte ortogonal.*

La determinación del valor de las fuerzas que actúan durante el proceso de torneado tiene una gran importancia a la hora de conocer las sollicitaciones mecánicas a las que se encuentra sometida la pieza mecanizada. La fuerza de reacción que actúa sobre la herramienta se divide en tres componentes.

- **Fuerza de corte (F_c):** a partir de la cual podremos calcular la potencia. También denominada fuerza principal de corte, se trata de la componente que ejerce una mayor influencia sobre la pieza.
- **Fuerza de avance (F_a):** componente que actúa en la dirección del avance longitudinal de la herramienta, dirección perpendicular al vector fuerza de corte.
- **Fuerza de deslizamiento (F_d):** fuerza que se ejerce en la dirección radial del avance de la herramienta, perpendicular a las dos fuerzas anteriores. A partir de ella se pueden calcular las tensiones cortantes que se dan en el plano de deslizamiento.

La resultante de la suma entre fuerza de corte, la fuerza de avance y la fuerza de deslizamiento se denomina F .

- **Fuerza de rozamiento (F_{roz}):** fuerza por el contacto entre la superficie de desprendimiento de la herramienta y la viruta.

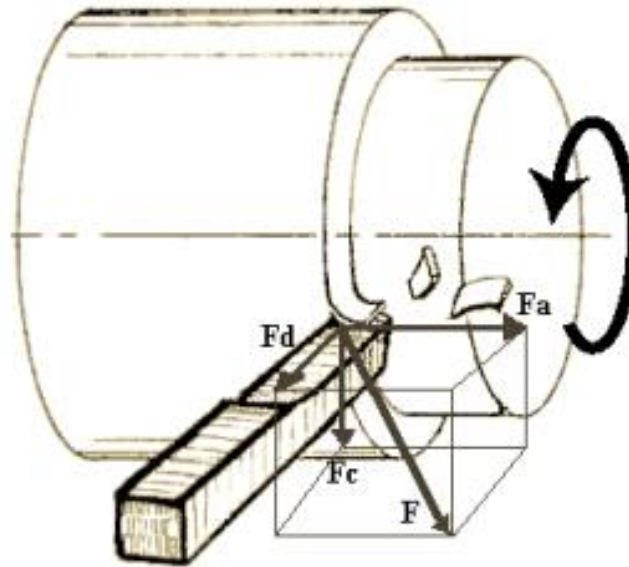


Figura 7 - Esquema de fuerzas actuantes durante un proceso de arranque de viruta.

2.3. Formación de viruta.

Los procesos de mecanizado por arranque de material se caracterizan por la obtención del diseño final mediante el desprendimiento de material. Este material residual con forma de lámina curva es denominado viruta. El proceso de formación de viruta requiere de la utilización máquinas-herramienta, formadas por elementos de sujeción y herramientas de corte, en las que se coloca y sujeta la pieza a mecanizar.

Como se observa en la Figura 8, durante el proceso de corte la viruta se forma debido al deslizamiento entre una serie de placas paralelas entre sí. La viruta deformada se encuentra moviéndose ascendentemente sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta mientras que, bajo el plano cortante, la pieza no ha sufrido deformación alguna.

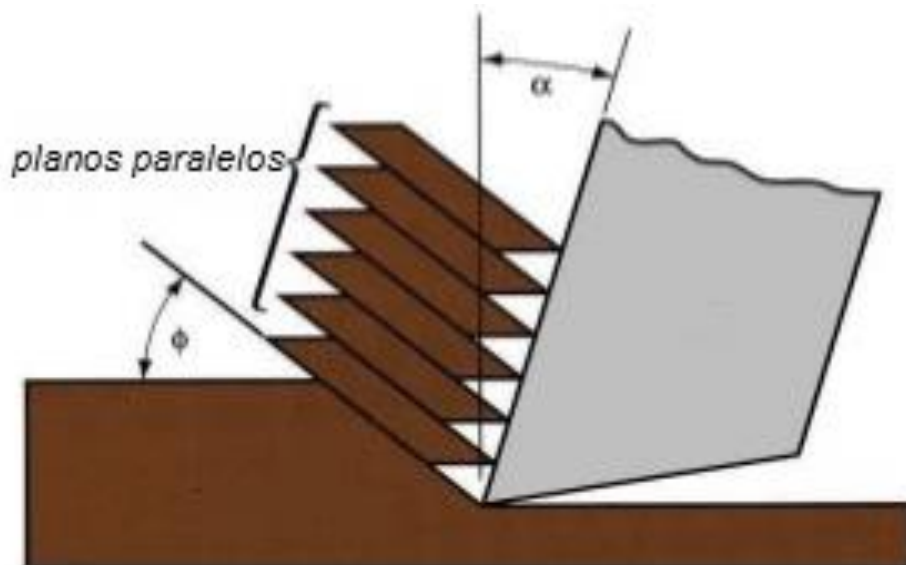


Figura 8 - Proceso de formación de viruta.

El proceso de formación de viruta durante el corte, su flujo, movimiento y morfología, depende principalmente de:

- El material de la pieza.
- La geometría y el material de la herramienta de corte empleada.
- Las condiciones de corte: velocidad de corte, avance y profundidad de pasada.

Estas características influirán en la variación de la fuerza de corte y de la temperatura que se alcanza durante el proceso, variando así la formación de viruta y la calidad del corte [7].

2.3.1. Tipos de viruta producida durante el mecanizado.

Variando algunos de los parámetros anteriores, como la velocidad de corte y el avance, estudiaremos la influencia que causan estos, así como la influencia de la segunda pasada en el mecanizado. De estos estudios obtendremos distintos tipos de morfología de viruta: **continua**, **escalonada o segmentada**, y **discontinua**. Cabe destacar que, cuanto más segmentada sea la viruta, más sencillo será el proceso de eliminación y evacuación.

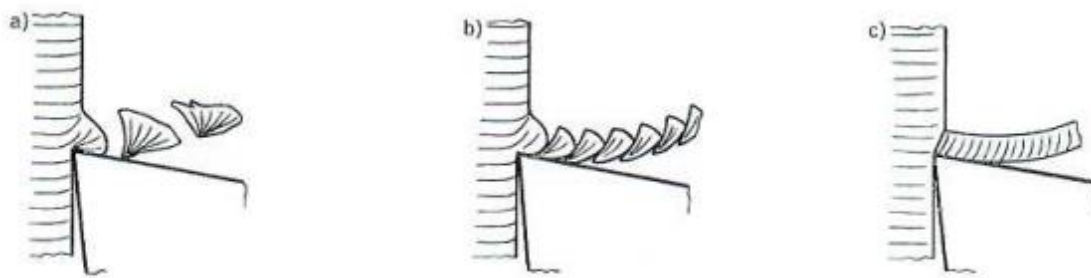


Figura 9 - a) Viruta discontinua; b) Viruta segmentada; c) Viruta continua.

En el caso de estudio de este proyecto, el material a mecanizar es un metal, el cual se encuentra formado por cristales denominados granos. Durante el proceso de corte, estos cristales son sometidos a un esfuerzo que los deformará hasta orientarlos en planos de deslizamiento. Al aumentar el esfuerzo aplicado, se producirá un mecanismo de deslizamiento entre dos regiones cristalinas adyacentes hasta alcanzar la rotura del material.

Por otro lado, la herramienta de corte utilizada durante el mecanizado debe presentar una dureza y resistencia al desgaste suficientes para soportar las fuerzas producidas durante el proceso de formación de viruta. Dependiendo de su geometría se obtendrán diferentes morfologías de viruta y grados de calidad en el corte.

Cabe destacar que la viruta obtenida durante este proceso será de un espesor menor al disminuir el parámetro de profundidad de corte debido a las tensiones a las que el material se somete, como se explica en [8]. A continuación, se desarrollarán los diferentes tipos de morfología de viruta mencionados anteriormente que podemos hallar durante el estudio de nuestro proyecto.

- **Viruta continua:** clase de viruta que no presenta fracturas en su geometría. Las características que facilitan la obtención de una viruta continua son principalmente el mecanizado de materiales dúctiles, la utilización de grandes ángulos de ataque, grandes velocidades de corte o pequeños avances.

Aunque generalmente aportan un buen acabado superficial, no son deseables en las máquinas herramienta debido a su gran longitud y continuidad, pudiendo llegarse a enredar en esta, entorpeciendo así el proceso de mecanizado.

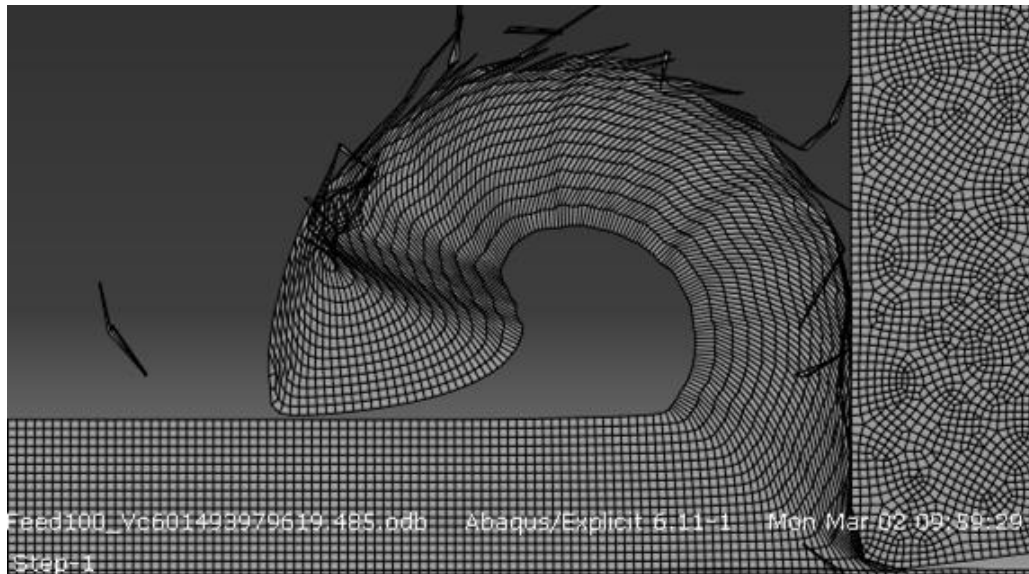


Figura 10 – Viruta continua.

- **Viruta discontinua:** clase de viruta que presenta fracturas y, por lo tanto, se separa en diferentes piezas. Se suele producir bajo las siguientes condiciones:
 - En materiales frágiles, duros y quebradizos, ya que estos no tienen la capacidad de absorber las deformaciones cortantes a las que se ve sometido el material.

- A velocidades de corte extremas, es decir, de valores muy bajos o muy altos.
- Profundidades de corte elevadas.
- Bajos ángulos de ataque.

Al contrario que la viruta continua, la formación de este tipo es recomendable debido a su fácil evacuación, conforme la viruta se va formando, se va desprendiendo del proceso en pequeños segmentos.

Aunque la calidad del acabado superficial empeora con respecto a la viruta continua, el filo de la herramienta tenderá a reducir las irregularidades que se formen, mejorando así dicha calidad. Cuando se forman virutas discontinuas, hay que tener en cuenta tanto la rigidez del portaherramientas como la de la máquina-herramienta para evitar vibraciones y traqueteos.

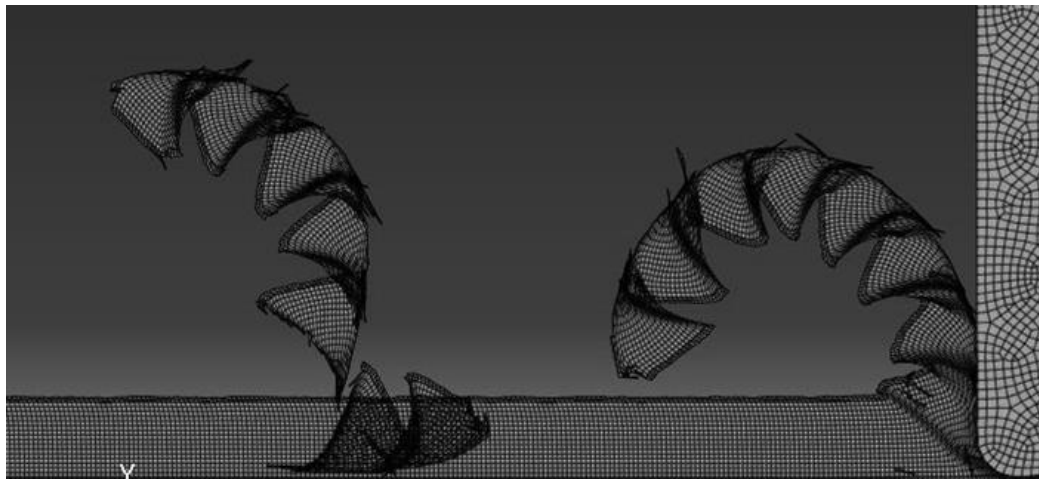


Figura 11 – Viruta discontinua.

- **Viruta serrada o no homogénea:** tipo de viruta deseable para casi todo tipo de procesos de formación de viruta, ya que su evacuación es más sencilla y disminuye la longitud de contacto herramienta-viruta. Se trata de un tipo de viruta con aspecto de diente de sierra que suele aparecer en metales tenaces, de baja conductividad térmica y una resistencia que disminuye drásticamente con el aumento de temperatura.

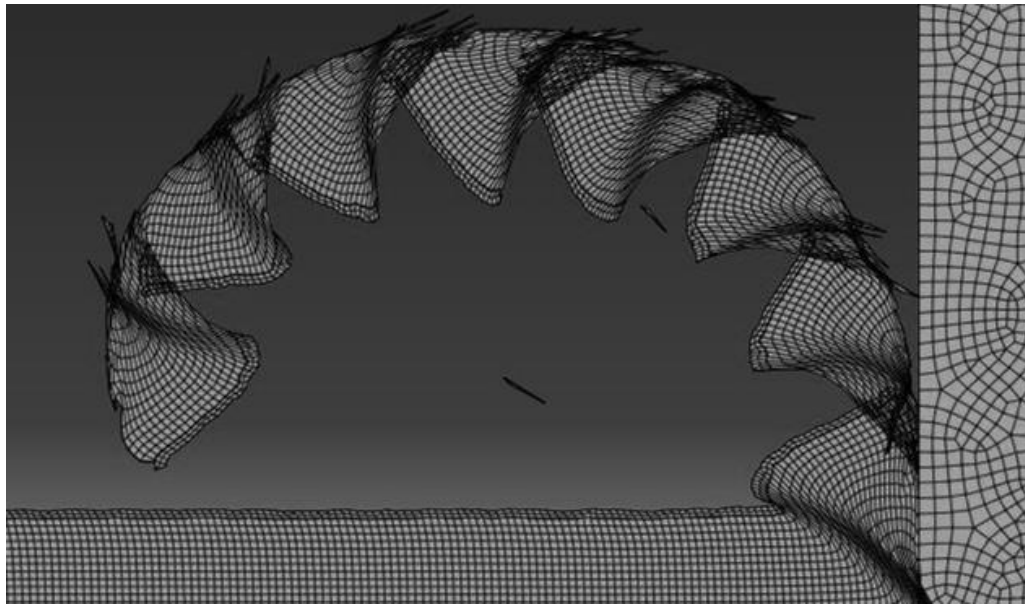


Figura 12 – Viruta serrada o no homogénea.

2.3.2. Zonas de deformación.

El proceso de formación de viruta se inicia en el momento en que la pieza a mecanizar es sometida a esfuerzos, los cuales producirán un aumento tanto de presión como de temperatura y darán lugar a fuertes deformaciones plásticas. Estos esfuerzos se verán traducidos en un proceso de deformación plástica o cizalladura localizado que se desarrolla en la región denominada zona de deformación primaria, el cual dará lugar a la morfología de viruta final obtenida. En esta zona de deformación se produce el 80% del calor generado durante el proceso de corte debido a las grandes deformaciones plásticas que aparecen.

La viruta continuará su recorrido deslizándose sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta, denominada zona secundaria. La deformación sufrida en esta zona es debido al fenómeno de fricción que se produce entre la viruta y la superficie de desprendimiento de la herramienta.

El calor generado en la zona secundaria es muy elevado y, aunque se disipe calor a través de la pieza y de la herramienta, la parte de calor que corresponde a la herramienta es difícil de evacuar. Como resultado de esta acumulación de calor en el punto de contacto entre la viruta y la herramienta durante el corte, se acumulará y se adherirá material al filo de la herramienta, dando lugar al fenómeno denominado filo recrecido. La viruta

continuará su movimiento de deslizamiento sobre esta zona hasta llegar al contacto con la superficie de desprendimiento de la herramienta. La formación de filo recrecido varía la geometría de la herramienta, por lo que afectará negativamente tanto al acabado superficial de la pieza como a la vida útil de la herramienta de corte.

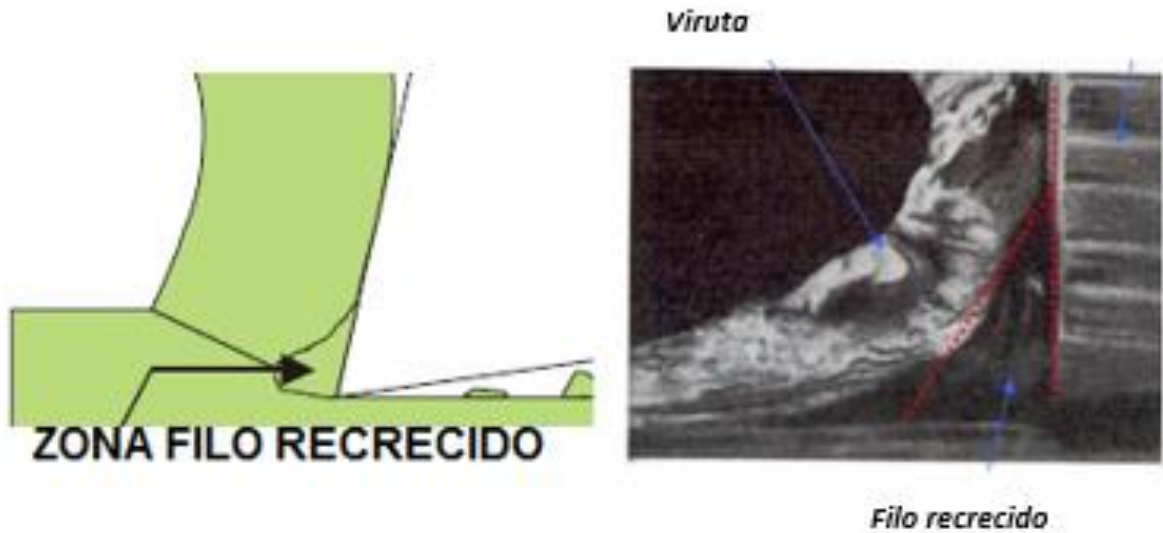


Figura 13 - Formación de filo recrecido durante mecanizado.

Finalmente aparece la zona terciaria entre la superficie de incidencia de la herramienta y la superficie mecanizada de la pieza. Esta deformación afecta en la calidad del acabado de la superficie de la pieza y puede inducir tensiones residuales en la pieza. No obstante, debido a la poca deformación plástica que se produce en esta zona, el valor de las presiones y temperaturas es significativamente menor que las que se encuentran en la zona secundaria.

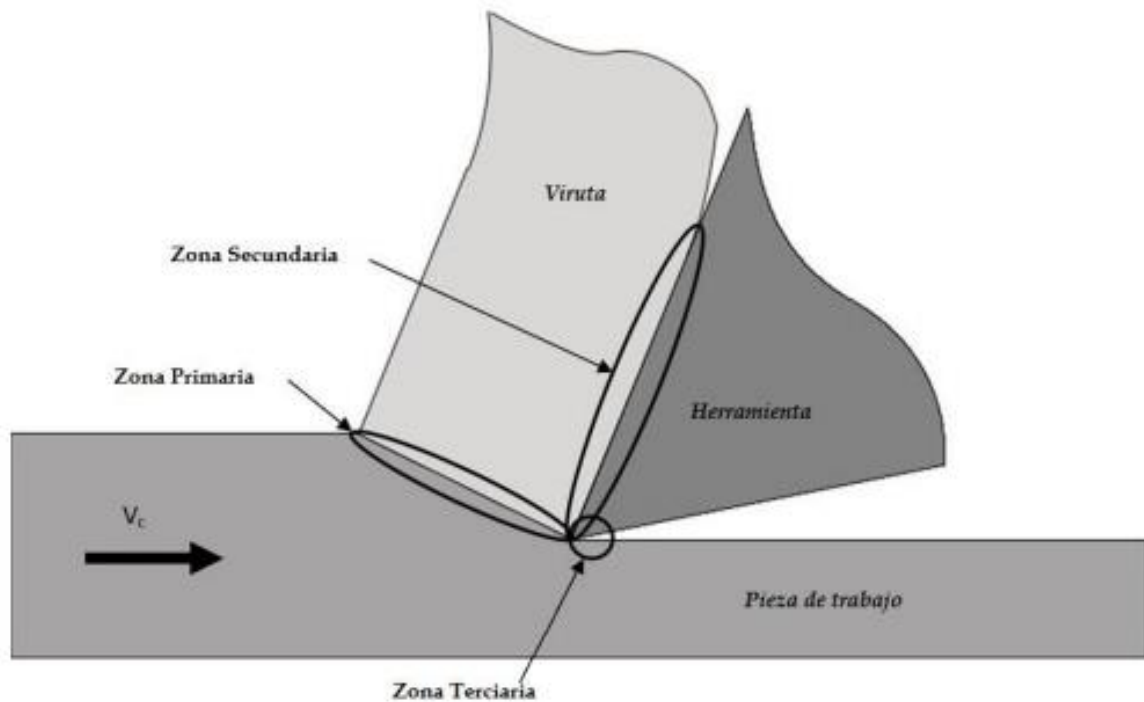


Figura 14 – Esquema de las zonas de deformación.

El punto de máxima temperatura se encuentra en el cruce de la zona primaria, la zona secundaria y la zona terciaria.

2.4. Marco regulador.

La normativa en cuanto al mecanizado por arranque de viruta es escasa. Existe normativa de obligado cumplimiento sobre riesgos, elementos de protección y medidas asociadas al uso de máquinas-herramienta de corte, así como normativa de responsabilidad ambiental.

Más allá de estas indicaciones, no se ha encontrado normativa relacionada con modelos numéricos de un proceso de mecanizado. Por tanto, este proyecto no se encuentra ligado a ninguna ley o normativa que limite el análisis realizado.

2.5. Impacto socio-económico.

Por un lado, el proyecto analiza un modelo numérico de elementos finitos cuya función principal es la simulación de un corte ortogonal del material Inconel 718. Tras validar experimentalmente este modelo se podrá afirmar su correcto funcionamiento y su posible utilización en la industria del mecanizado. Este tipo de procesos permiten obtener información sobre los parámetros fundamentales del mecanizado –tensiones residuales, presiones, temperatura, deformación y morfología-. De esta manera, nuestro modelo numérico podrá emplearse en diferentes estudios de mecanizado, bien variando el material de la pieza, bien modificando los parámetros de entrada, o bien cambiando las características de la herramienta de corte. La utilización de este modelo numérico podría generar un ahorro de tiempo, dinero, materia prima y recursos para la industria.

Sin la utilización de un modelo numérico para el análisis de un mecanizado, los costes experimentales se incrementarían enormemente. El salario de la mano de obra empleada, el coste de amortización de la máquina-herramienta de corte y el coste de materia prima son algunos de los costes que se ahorran empleando este tipo de modelos. Experimentalmente, el gasto energético y material, así como el residuo producido, suponen un problema medioambiental que, mediante modelos numéricos, puede ser eliminado.

Por otro lado, el proyecto analiza el comportamiento del Inconel 718 ante un mecanizado, así como la influencia de algunos parámetros de corte fundamentales. Se trata de un material que presenta dificultades para ser mecanizado, por lo que este estudio permitirá conocer su comportamiento para los diferentes parámetros de corte analizados sin necesidad de realizar investigaciones experimentales, lo que supondría un gran ahorro para la industria del mecanizado. Además, existen algunas carencias en el conocimiento del Inconel 718 que podrían suplirse a través de estudios como este.

CAPÍTULO III: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

3.1. Introducción.

Para el estudio de la influencia de pasadas sucesivas en el mecanizado del Inconel 718 se ha utilizado un modelo de elementos finitos en dos dimensiones desarrollado en el software Abaqus. Los modelos numéricos representan una alternativa importante en el estudio de diferentes situaciones, ya que aportan información acerca de variables que no pueden ser medidas o que son complicadas de medir experimentalmente.

Actualmente, el método de elementos finitos se ha convertido en una herramienta fundamental a la hora de analizar el mecanizado de un proceso de corte de metal. Esto es debido a que este método, encargado de discretizar un modelo continuo, permite obtener datos difíciles de medir experimentalmente tales como las fuerzas, presiones, energías y temperaturas que aparecen durante el mecanizado. Además, la utilización de un modelo numérico se considera un método más económico que el de la realización de ensayos experimentales. En la actualidad se frecuenta el uso de paquetes informáticos de elementos finitos previamente programados.

El método de elementos finitos divide a un sólido continuo en una cantidad de partes finitas denominadas elementos. Para cada elemento existen en su contorno una serie de puntos representativos denominados nodos. A este proceso de discretización se le denomina mallado y, una vez realizado, se podrán obtener más fácilmente los valores de desplazamiento, tensión y deformación de los nodos que componen la malla.

El desarrollo de este tipo de métodos permitirá reducir costes experimentales. Por otro lado, este método presenta algunas limitaciones tales como la falta de precisión en los resultados cuantitativos [7].

Pese a que el mecanizado tiene lugar en un espacio tridimensional, es común que la modelización numérica por elementos finitos de los procesos de mecanizado sea realizada en dos dimensiones. De esta manera, estaremos asumiendo la deformación plana del material. Esta simplificación de dimensiones se realiza con la intención de disminuir el

CAPÍTULO III: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

tiempo de cálculo y el tamaño del elemento, ganando así precisión en la simulación. No obstante, los resultados obtenidos no dejarán de ser un valor aproximado de cálculo [9].

El software Abaqus será el utilizado para crear nuestro modelo numérico en 2D, cuyos parámetros de entrada son variables. Este software emplea un análisis Lagrangiano, lo que quiere decir que la malla computacional se deforma con el material. Este tipo de formulación precisa de la utilización de un criterio de fallo, el cual se trata en este caso de la ley de Johnson-Cook. Además, existirá una fricción en el área de contacto herramienta-viruta y en la parte trasera de la herramienta. Cabe destacar que el modelo utilizado contará con una herramienta de material rígido y una pieza de trabajo de material deformable. Tras crear dicho modelo, se implementará para calcular todas las variables necesarias para nuestro estudio.

En este proyecto se estudiará, a través del modelo de elementos finitos descrito a continuación, la influencia de los parámetros de corte velocidad de corte y avance en la morfología de viruta obtenida en la primera y segunda pasada del mecanizado en el Inconel 718. Cabe destacar que el modelo descrito en Abaqus también ha sido validado, no siendo su desarrollo el objeto de este proyecto. Los parámetros de corte empleados en las simulaciones son los adjuntados en la Tabla 2.

Tabla 2 – Parámetros de corte empleados en las simulaciones.

Avance (μm)	50 – 100 – 150
Velocidad de corte (m/min)	60 – 90 – 120 – 180 – 240

A este análisis se le añadirá el estudio de la segunda pasada en el mecanizado para observar la influencia de los efectos generados por la primera pasada en las propiedades del material.

Finalmente, este modelo deberá ser validado para su posterior estudio. Para ello, se ha tenido acceso a los datos experimentales del estudio realizado por Mercè Seguí Salom en su trabajo de fin de grado “*Morfología de la viruta obtenida durante el torneado de Inconel 718*” [2].

3.2. Descripción del modelo numérico.

Este modelo numérico simula el corte ortogonal de una pieza cuyo material es el Inconel 718, mientras que la herramienta que llevará a cabo el corte se supone rígida. Será la herramienta la que llevará a cabo los movimientos de corte, profundidad y avance.

La **herramienta de corte** utilizada en el mecanizado está dotada de las siguientes **características geométricas**.

- Ángulo de incidencia, $\alpha = 7^\circ$
- Ángulo de desprendimiento, $\gamma = 0^\circ$
- Ángulo de filo, $\beta = 83^\circ$

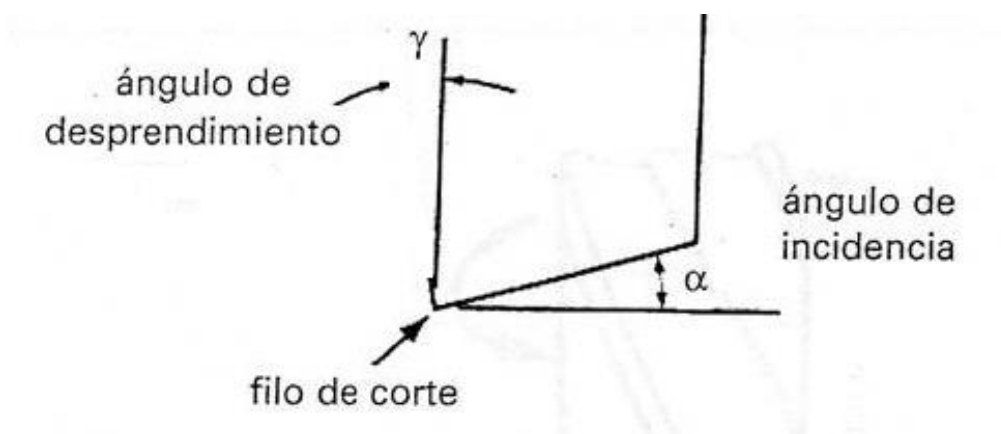


Figura 15 – Esquema de características geométricas de la herramienta de corte.

Por otro lado, la geometría de la pieza a mecanizar se define como un rectángulo de longitud 2mm y altura variable, dependiente del valor de avance empleado.

3.3. Materiales.

El modelo se puede dividir en dos partes fundamentales: la herramienta y la pieza mecanizada, la cual estará compuesta por el material Inconel 718. La herramienta se trata de un elemento rígido mientras que las propiedades del Inconel 718 empleadas se adjuntan en la Tabla 3.

Tabla 3 – Propiedades del material Inconel 718 utilizadas en el modelo numérico.

Conductividad térmica (λ)	10,31 W/(K·m)
Densidad (ρ)	$8 \cdot 10^3$ kg/m ³
Módulo de Young (E)	217 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33
Calor específico (c)	427 J/kg·K
Coefficiente de expansión (α)	$1,3 \cdot 10^{-5}$ K

3.4. Características geométricas y condiciones de contorno.

La simulación del corte ortogonal del Inconel 718 se realizará mediante un modelo bidimensional. El conjunto estudiado en dos dimensiones está compuesto por una pieza base y una herramienta de corte. A su vez, la pieza base se dividirá mediante una interfase en otras dos partes, la viruta y la pieza base. Al tratarse del estudio del mecanizado de dos pasadas, tendremos dos interfases que separarán la viruta que se forma en cada pasada de la pieza base restante.

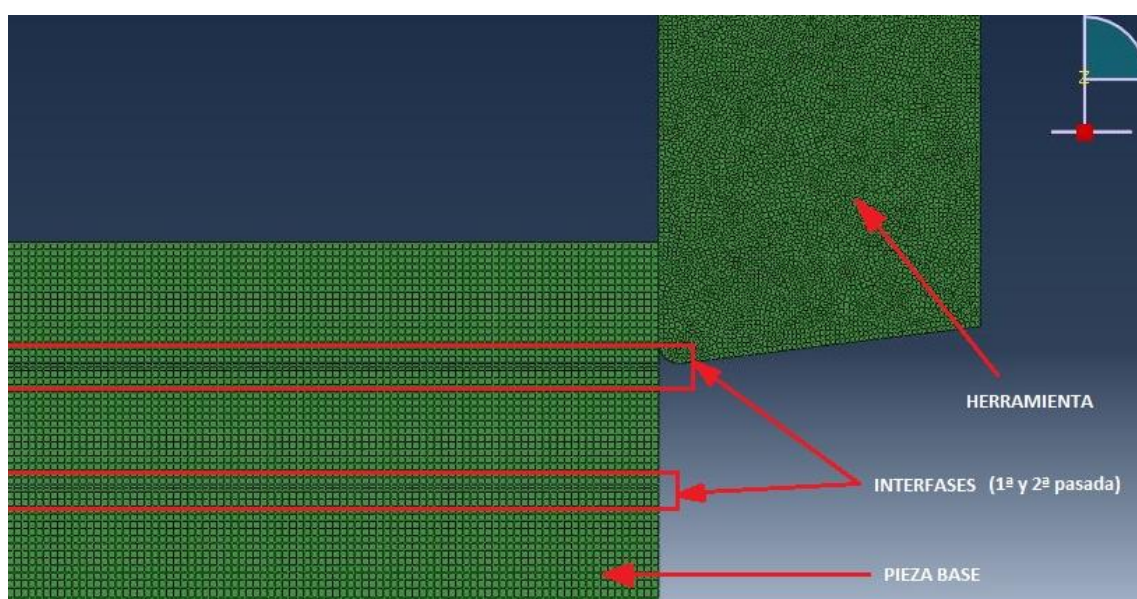


Figura 16 – Partes que componen el modelo numérico.

CAPÍTULO III: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

Con respecto a las condiciones de contorno de la pieza base a mecanizar, cabe destacar que la base y los laterales de la pieza están empotrados, impidiendo así su movimiento tanto horizontal como vertical, mientras que la superficie superior se encuentra libre para ser mecanizada. Por otro lado, la herramienta se supondrá un cuerpo rígido indeformable. Estas condiciones de contorno, así como las características geométricas de la pieza base, se encuentran resumidas en la Figura 17.

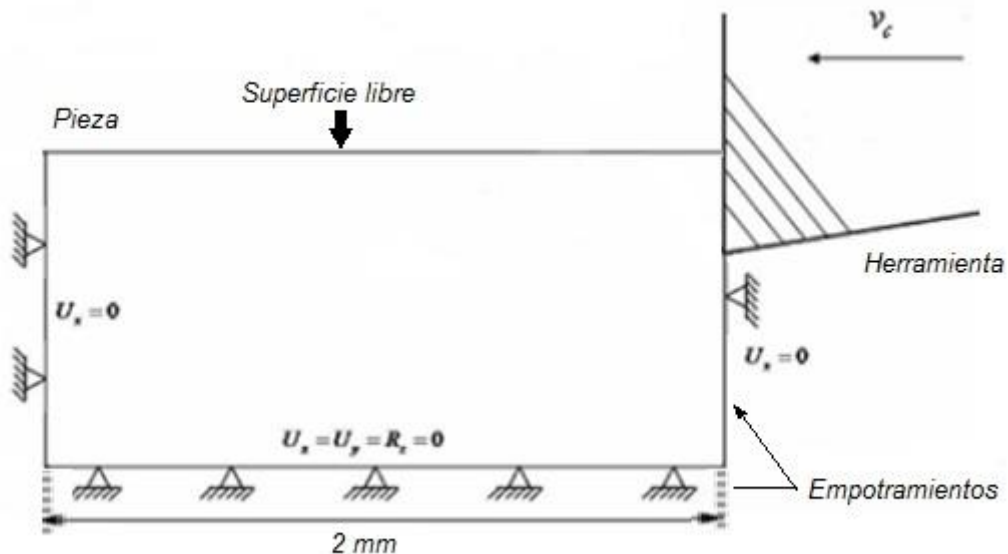


Figura 17 – Características geométricas y condiciones de contorno del modelo.

3.5. Características del mallado.

El tipo de mallado de la pieza base es CPE4RT.

- C: tipo de elemento cuadrilátero.
- PE: deformación plana.
- 4: número de nodos por elementos.
- R: interpolación en el centro del elemento.
- T: se tiene en cuenta la temperatura como una variable.

CAPÍTULO III: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

El tamaño de la malla empleado en la pieza base para la simulación de este proyecto varía según la zona estudiada. Las zonas diferenciadas son: las dos virutas y las dos interfases correspondientes a la primera y segunda pasada, y la pieza base final una vez mecanizada. Se ha empleado un refinamiento de malla en aquellas zonas susceptibles de sufrir erosión debido a las grandes deformaciones.

El tamaño de malla, tanto de las virutas como de las interfases correspondientes a la 1ª y 2ª pasada, dependerá de los avances empleados en los diferentes estudios (50, 100, 150 μm). A continuación, se adjunta la Tabla 4 que recoge estos datos.

Tabla 4 – Tamaño de malla de las virutas y las interfases dependiendo del avance.

Avance	Tamaño elemento	
	Virutas	Interfases
50 μm	3x3 μm	3x1,5 μm
100 μm	6x6 μm	6x3 μm
150 μm	9x9 μm	9x4,5 μm

3.6. Ecuación constitutiva. Johnson-Cook.

En los modelos analíticos se utilizan expresiones simplificadas para definir el comportamiento plástico del material. De esta manera, se obtendrán expresiones sencillas del comportamiento del material mecanizado.

En este modelo de elementos finitos, la ecuación constitutiva utilizada, que relaciona la tensión de Von Mises σ (tensión efectiva) con la deformación efectiva ϵ , es la de Johnson-Cook. El modelo de Johnson-Cook es un modelo termoviscoplastico desarrollado específicamente para materiales metálicos, consiguiendo así representar el comportamiento plástico de estos cuando se encuentran sometidos a altas temperaturas y velocidades de deformación [7].

La ecuación de Johnson-Cook, que nos permite obtener la tensión de equivalente de Von Mises a la que se someten estos materiales, corresponde a la ecuación (3).

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right) \quad (3)$$

- σ : tensión de fluencia (MPa).
- ε : deformación plástica efectiva.
- $\dot{\varepsilon}$: velocidad de deformación plástica efectiva (s^{-1}).
- $\dot{\varepsilon}_0$: velocidad de deformación plástica de referencia (s^{-1}).
- A : límite elástico a temperatura ambiente (MPa).
- B : constante de endurecimiento por deformación del material (MPa).
- n : parámetro de endurecimiento por deformación del material.
- C : sensibilidad del material a la velocidad de deformación.
- m : parámetro de sensibilidad térmico.
- T : temperatura en cada instante (K).
- T_0 : temperatura ambiente (K).
- T_f : temperatura de fundición (K).

Esta ecuación se encuentra dividida en tres términos, de los cuales el primero define el endurecimiento por deformación del material, el segundo la velocidad de deformación y el tercero el ablandamiento por la temperatura.

- $(A + B \cdot \varepsilon^n)$: término elasto-plástico. Al ser deformado, el metal tiende a endurecerse por deformación y, por lo tanto, cuanto mayor sea la deformación mayor será su resistencia. El factor exponencial n determina la sensibilidad al endurecimiento por deformación del material.
- $\left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right)$: viscosidad. Este término mide la deformación del material en un periodo de tiempo. Cuanto mayor sea la velocidad de corte del mecanizado, mayor será la velocidad de deformación, lo que provoca un incremento en la resistencia del material.
- $\left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right)$: ablandamiento por temperatura. Este último grupo define el ablandamiento por aumento de temperatura que el material sufre. Cuanto menor

sea el factor exponencial m del material, más sensible será el metal a las variaciones de temperatura. Es por ello por lo que, al aumentar la temperatura del material, el módulo de elasticidad se verá reducido y como consecuencia, la curva tensión-deformación disminuye sus valores de tensión.

Los parámetros utilizados de Johnson-Cook en la pieza mecanizada de este proyecto se muestran en la Tabla 5. Estos valores fueron obtenidos de [10].

Tabla 5 – Parámetros de la ecuación de Johnson-Cook [10].

A	B	C	n	m	Temperatura fundición	Temperatura ambiente
980 MPa	1370 MPa	0,02	0,164	1,03	1573 K	293 K

3.7. Criterio de rotura.

El criterio de rotura empleado en el diseño del modelo numérico implica que el material romperá, es decir, la viruta se separará del resto del material, al alcanzarse un valor de cizalladura $\left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{3}}\right)$ superior a su valor límite. El valor seleccionado en este caso para el coeficiente de cizalladura será de 2,5. El material romperá al confirmarse la siguiente desigualdad:

$$\frac{\varepsilon}{\sqrt{3}} \geq 2,5 \quad (4)$$

3.8. Condiciones de fricción.

Durante el mecanizado se produce rozamiento en dos zonas concretas: deslizamiento herramienta-superficie mecanizada y deslizamiento viruta-herramienta.

El coeficiente de rozamiento según la ley de Coulomb es independiente de la velocidad de deslizamiento. En este proyecto se han utilizado dos coeficientes de Coulomb constantes idénticos para las dos zonas principales de rozamiento.

En la zona de contacto herramienta-superficie mecanizada se aplica un coeficiente de Coulomb μ constante de valor 0,4.

Con respecto al contacto herramienta-viruta, la viruta desliza sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta, provocando una fricción cuyo coeficiente de Coulomb μ constante es de 0,4, excepto en la zona más cercana al filo de la herramienta en la superficie de desprendimiento, en la cual la viruta se adhiere a la herramienta.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1. Análisis de resultados.

En este apartado se presenta un análisis de la morfología de viruta en la 1ª y la 2ª pasada del modelo numérico de elementos finitos, así como la influencia de los parámetros de corte en la misma. Para ello, se diferenciarán tres tipos de morfología de viruta: *continua*, *serrada* y *discontinua*.

1. Avance = 0,05 mm; $V_c = 60$ m/min.
2. Avance = 0,05 mm; $V_c = 90$ m/min.
3. Avance = 0,05 mm; $V_c = 120$ m/min
4. Avance = 0,05 mm; $V_c = 180$ m/min.
5. Avance = 0,05 mm; $V_c = 240$ m/min.
6. Avance = 0,10 mm; $V_c = 60$ m/min.
7. Avance = 0,10 mm; $V_c = 90$ m/min.
8. Avance = 0,10 mm; $V_c = 120$ m/min.
9. Avance = 0,10 mm; $V_c = 180$ m/min.
10. Avance = 0,10 mm; $V_c = 240$ m/min.
11. Avance = 0,15 mm; $V_c = 60$ m/min.
12. Avance = 0,15 mm; $V_c = 90$ m/min.
13. Avance = 0,15 mm; $V_c = 120$ m/min.
14. Avance = 0,15 mm; $V_c = 180$ m/min.
15. Avance = 0,15 mm; $V_c = 240$ m/min.

Siendo V_c el parámetro correspondiente a la velocidad de corte.

El primer caso de estudio (*avance=0,05 mm* y $V_c = 60$ m/min) no pudo ser estudiado a través de la simulación debido a un error de programación.

Como se ha comentado con anterioridad, el estudio de la morfología de viruta tiene una gran importancia para la mejora del proceso de mecanizado. La viruta debe ser tratada para obtener un tamaño y forma que no interrumpa el proceso de trabajo. Sin el análisis

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

de su geometría y su tratamiento, la viruta podría acumularse en masas de virutas largas y enmarañadas, las cuales dificultarían el mecanizado.

El proceso de formación de viruta durante el mecanizado se define a través de su flujo, movimiento y morfología. Estos parámetros dependen principalmente de los siguientes parámetros:

- El material del que está formada la pieza a mecanizar.
- El material y geometría de la herramienta de corte.
- Los parámetros de corte utilizados: velocidad de corte, avance y profundidad.

Estas características influirán en la fuerza de corte y temperatura alcanzada por la pieza, variando así la morfología de viruta. Además, como se analizará a continuación, la geometría de la viruta obtenida se ve altamente modificada entre la primera y la segunda pasada del mecanizado.

Por otro lado, los resultados obtenidos a través del software Abaqus dependerán también en gran medida de la ecuación constitutiva empleada. En nuestra simulación se utilizó la ecuación de Johnson-Cook con los parámetros descritos anteriormente, los cuales aproximaron de forma considerable nuestros resultados a los obtenidos experimentalmente.

En primer lugar, se analizará el cambio en la forma de viruta variando la velocidad de corte y observando la influencia de la 1ª y 2ª pasada en el mecanizado, manteniendo a su vez el avance constante. Para parámetros inferiores de velocidad de corte, la temperatura de la viruta sin deformar en la zona primaria de corte será menor a la de la viruta deformada, lo que generará un endurecimiento por deformación del material y, por lo tanto, la creación de virutas continuas en el proceso de corte.

A medida que aumente esta temperatura, el endurecimiento por deformación del material se verá compensado por el reblandecimiento térmico del mismo y con ello, una menor resistencia a la deformación. Por lo tanto, al aumentar el parámetro de la velocidad de corte, aumentará la temperatura, dando lugar a una morfología de viruta segmentada o discontinua.

Este proyecto se centra como estudio principal en la influencia de la segunda pasada del mecanizado. El estudio de la viruta se dividirá dependiendo de la influencia de la velocidad de corte, del avance y de la segunda pasada.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Teniendo en cuenta que los parámetros característicos de la morfología de corte (pico, valle, ancho de segmento y ángulo de cizalladura) únicamente son válidos para una morfología de viruta serrada y, por lo tanto, no son aplicables a la morfología obtenida durante la primera pasada, sólo se podrá aplicar una comparación cualitativa en este apartado. A continuación, manteniendo el avance invariable, se estudiará la influencia de la velocidad de corte sobre la morfología de viruta, tanto en la primera como en la segunda pasada del mecanizado. Lo mismo ocurrirá para el análisis de la influencia del avance. Por último, se analizará la evolución entre la morfología de la primera y de la segunda pasada.

4.1.1. Influencia de la velocidad de corte.

Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad de corte es uno de los parámetros principales que influyen en la morfología que adoptará la viruta. A continuación, se adjuntan las imágenes de la morfología de viruta de los ensayos numéricos tanto para la primera como para la segunda pasada para un avance de 0,05 mm dependiendo del parámetro de la velocidad de corte.

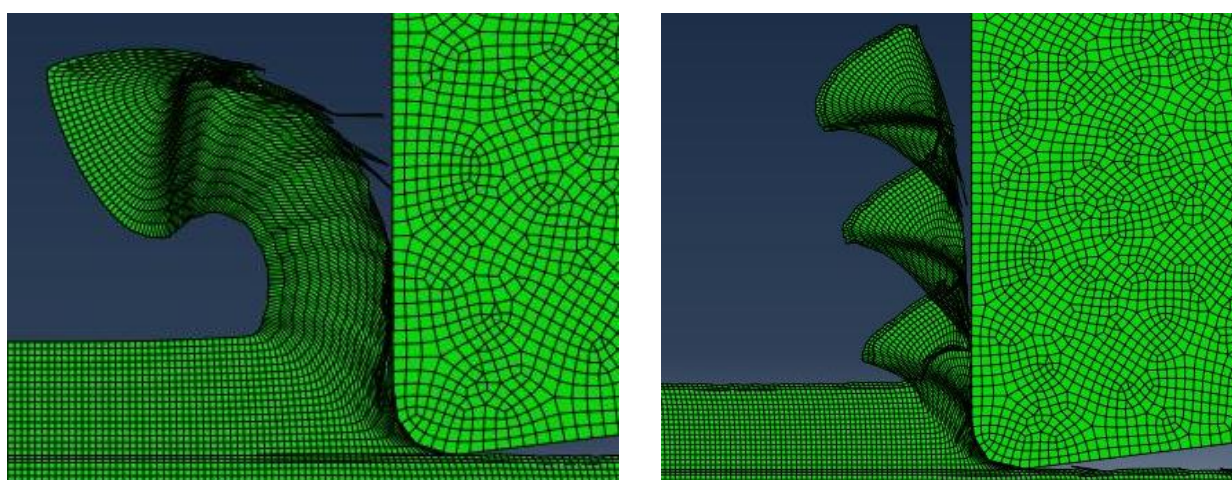


Figura 18 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 90 m/min.

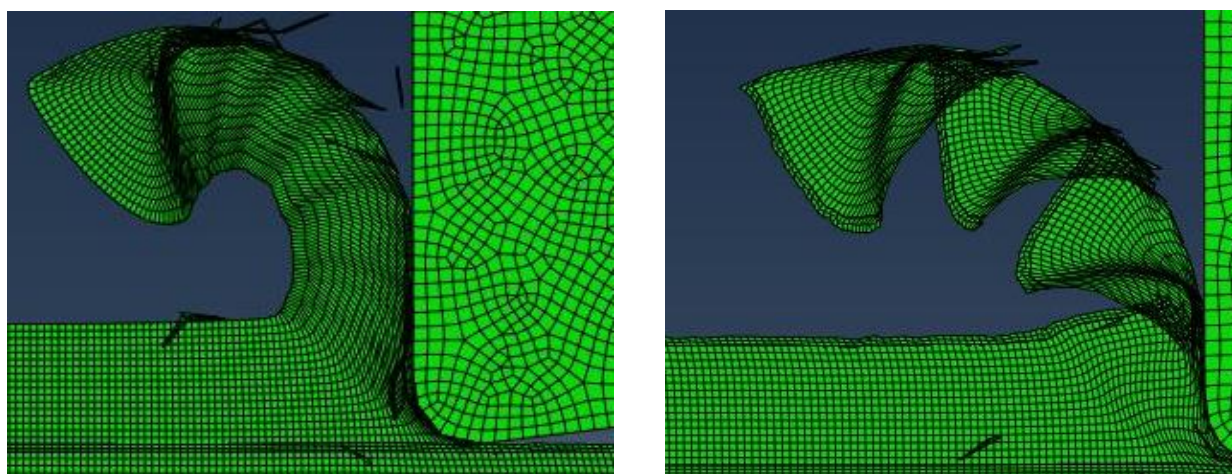


Figura 19 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 120 m/min.

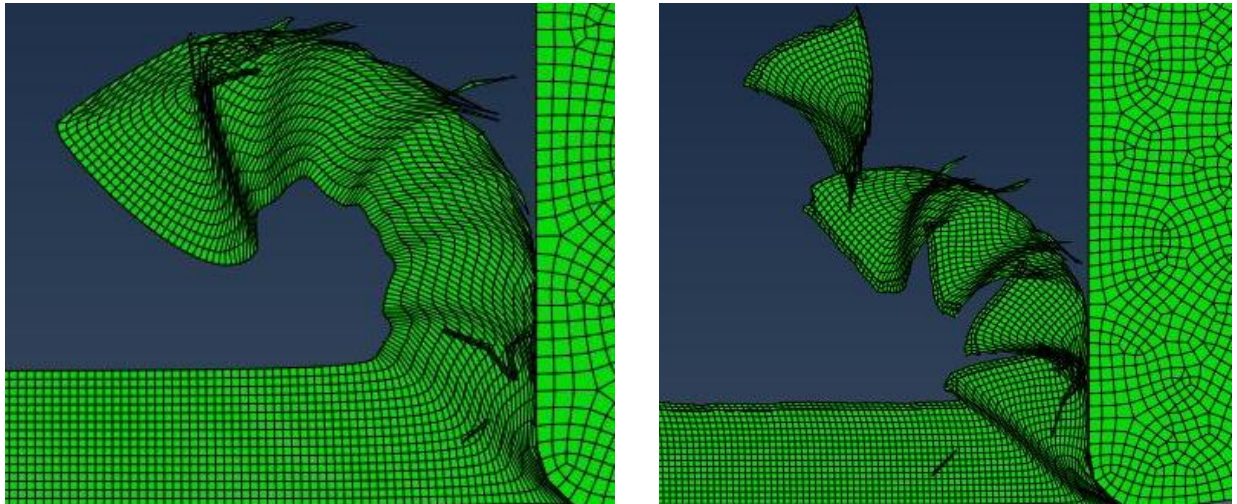


Figura 20 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 180 m/min.

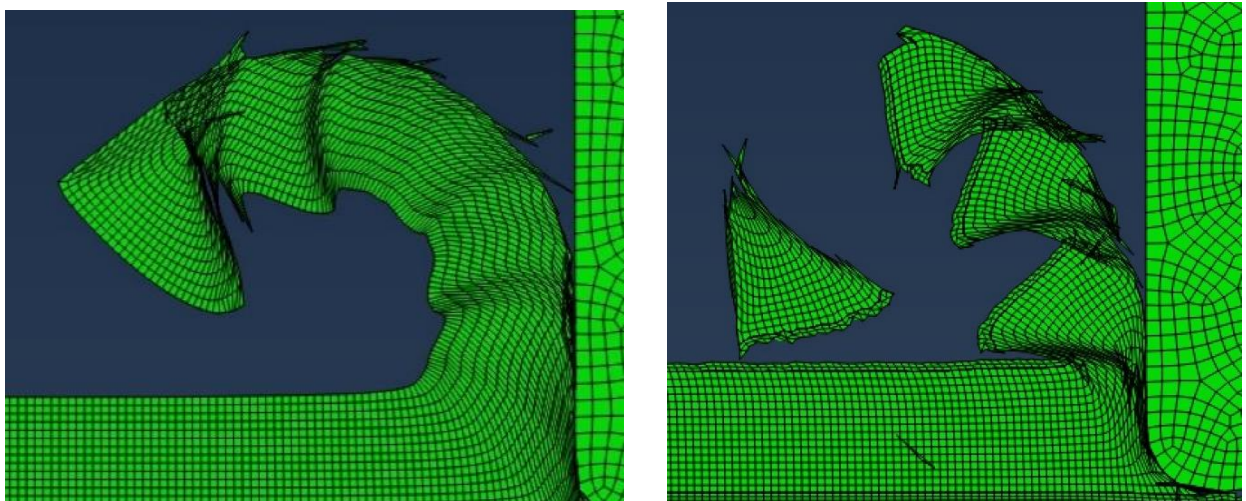


Figura 21 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,05 mm y velocidad de corte 240 m/min.

Para un avance de 0,05 mm constante podemos observar una gran variación de la morfología de viruta dependiendo de la velocidad de corte. En el caso de la primera pasada, la viruta se mantiene continua y homogénea para valores pequeños de velocidad de corte. Tanto para 180 m/min como para 240 m/min, Figuras 20 y 21, puede observarse una morfología algo más inestable al inicio del mecanizado, sin llegar a diferenciarse la formación de dientes. Durante la segunda pasada del mecanizado, por el contrario, tanto para velocidades de corte bajas como altas, la forma de la viruta será profundamente serrada, formada por unos dientes perfectamente marcados. Para los valores de 180 m/min y 240 m/min, la viruta alcanza su punto de rotura, desprendiéndose en ambos casos el primero de los dientes. Las siguientes figuras muestran la evolución para 0,10 mm.

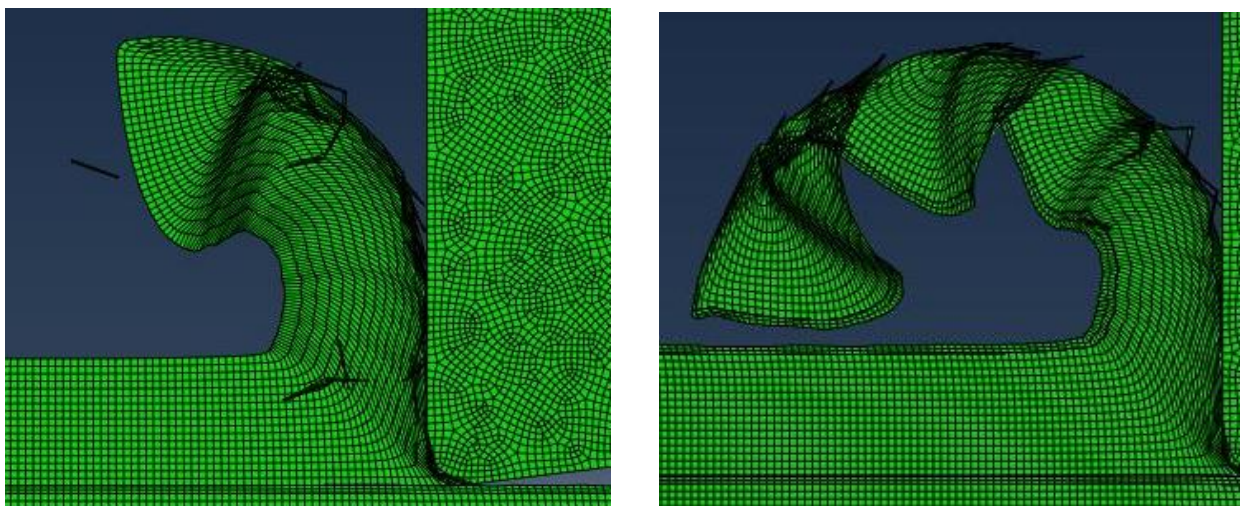


Figura 22 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 60 m/min.

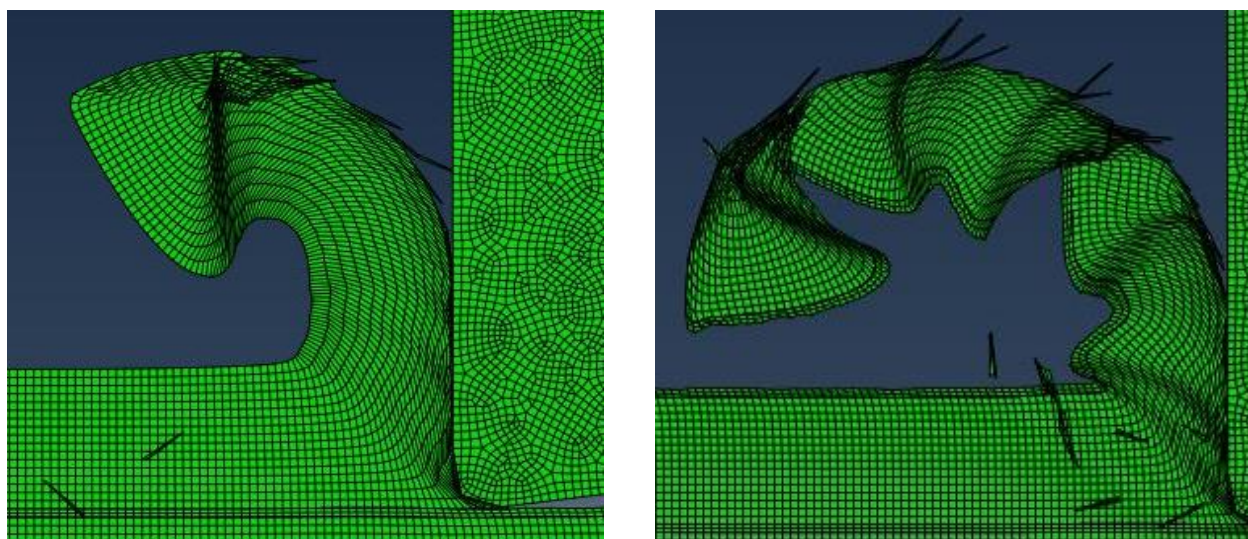


Figura 23 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 90 m/min.

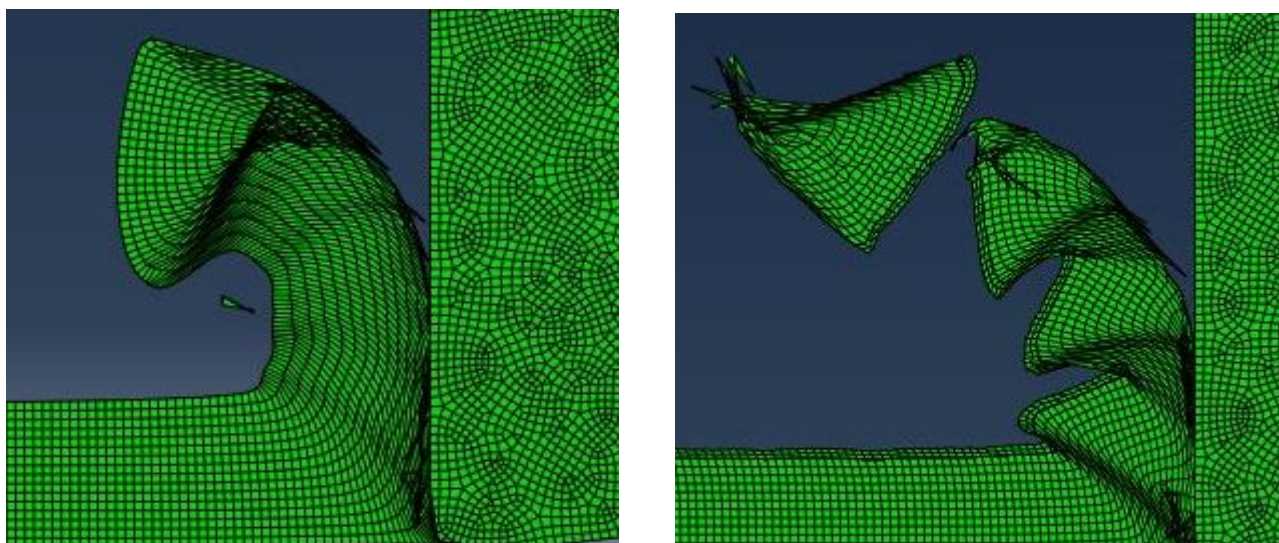


Figura 24 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 120 m/min.

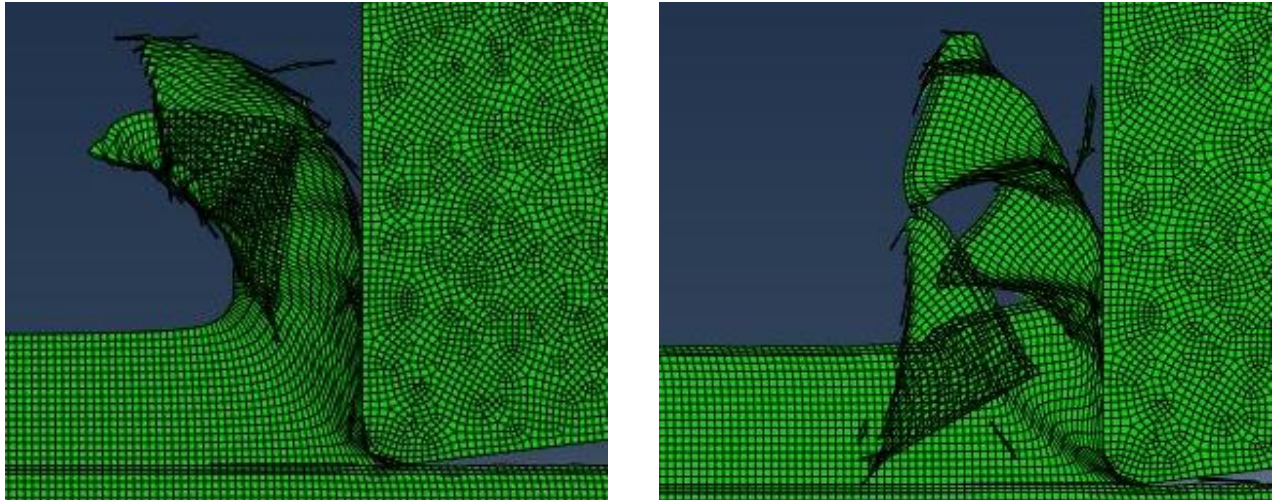


Figura 25 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 180 m/min.

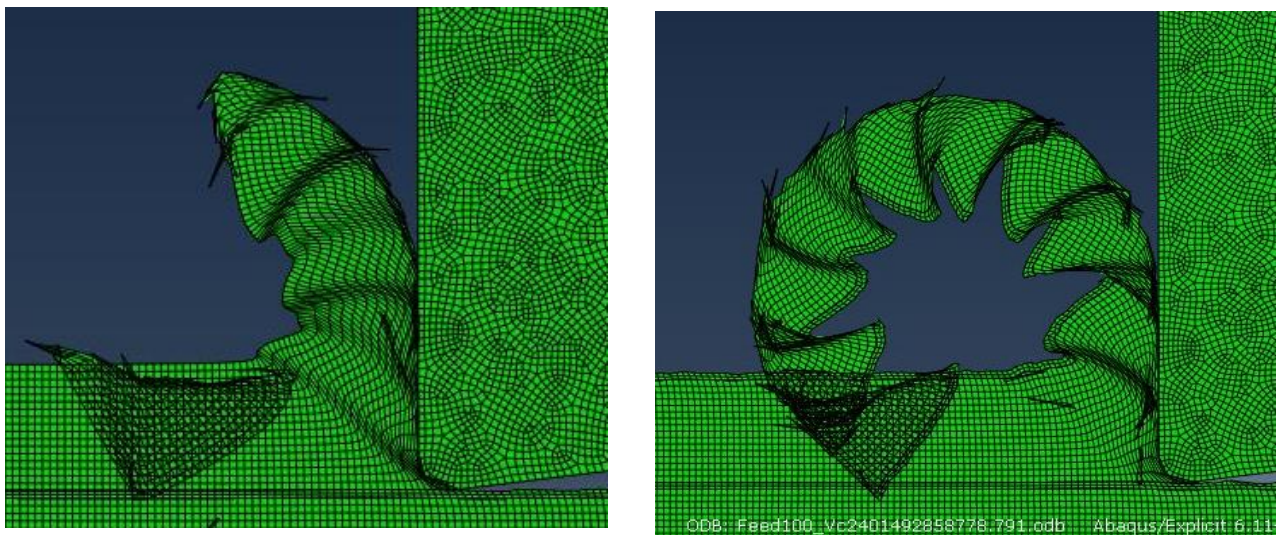


Figura 26 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 240 m/min.

En el caso de que el valor para el avance sea de 0,10 mm, durante la primera pasada y para las velocidades de corte inferiores (60 m/min, 90 m/min y 120 m/min), se observa que la viruta es continua y no presenta ninguna discontinuidad en su geometría. Sin embargo, para las velocidades más altas, se distingue cierta inestabilidad en su continuidad, sin llegar a diferenciarse dientes. Además, en ambos casos se desprende el inicio de la viruta, en el cual se había formado un único diente. Por el contrario, durante la segunda pasada del mecanizado, la morfología será profundamente serrada para todas las velocidades de corte estudiadas. Además, para las velocidades de 120, 180 y 240 m/min, la viruta alcanza su punto de rotura y algunas de sus partes se separan del resto de la viruta. Las siguientes figuras muestran la evolución para 0,15 mm.

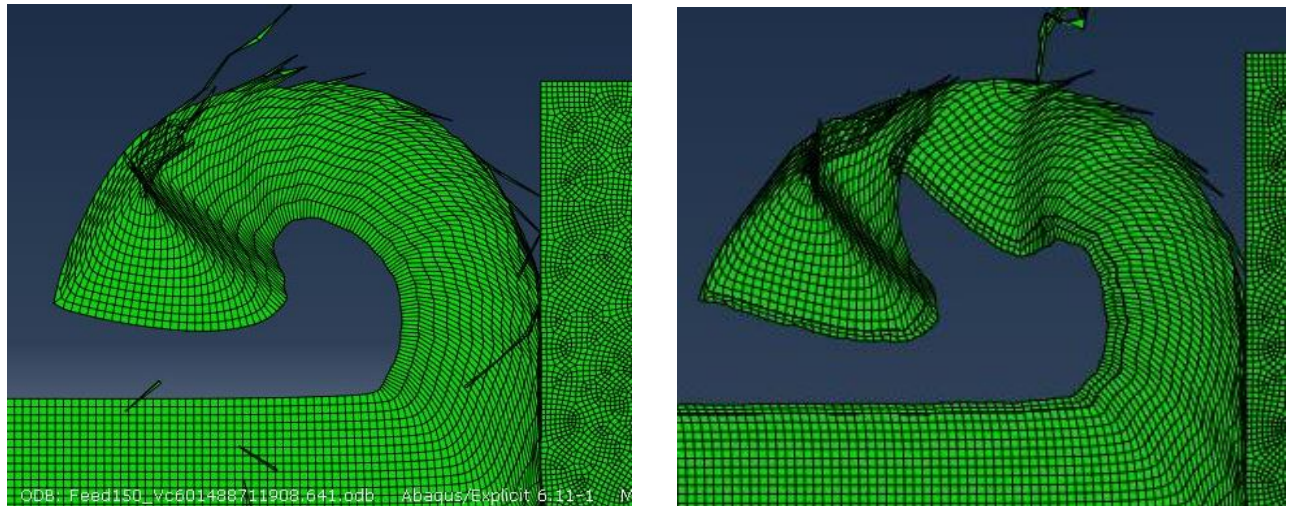


Figura 27 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 60 m/min.

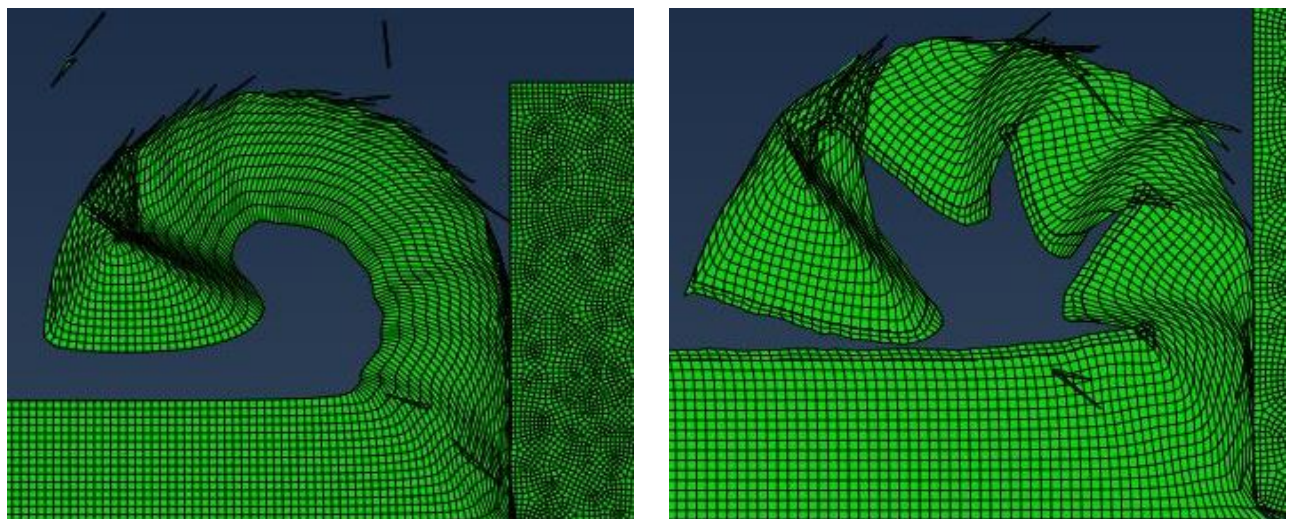


Figura 28 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 90 m/min.

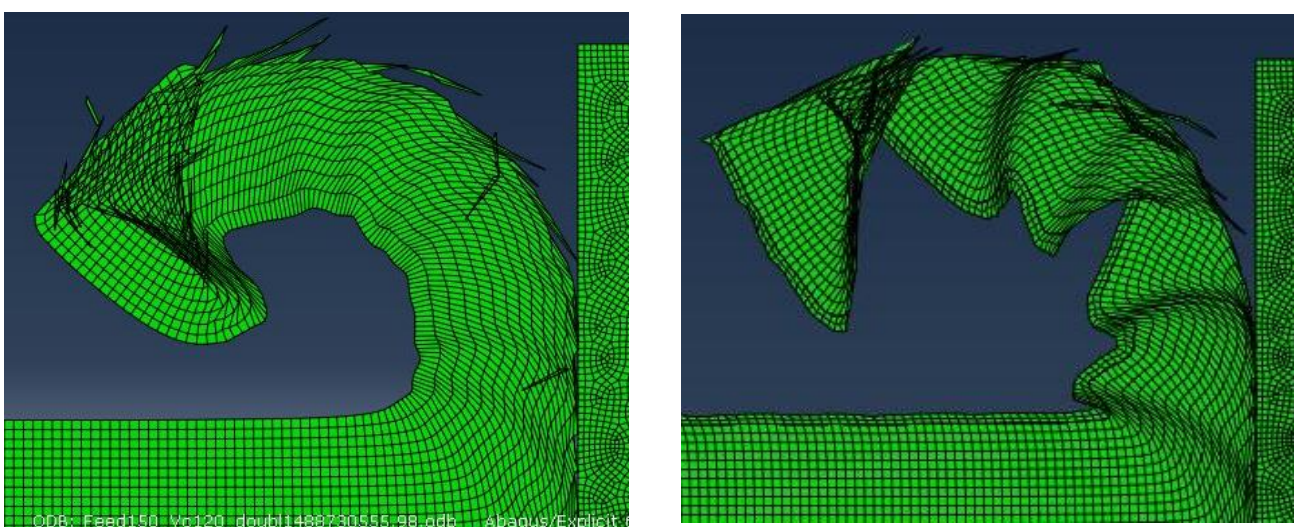


Figura 29 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 120 m/min.

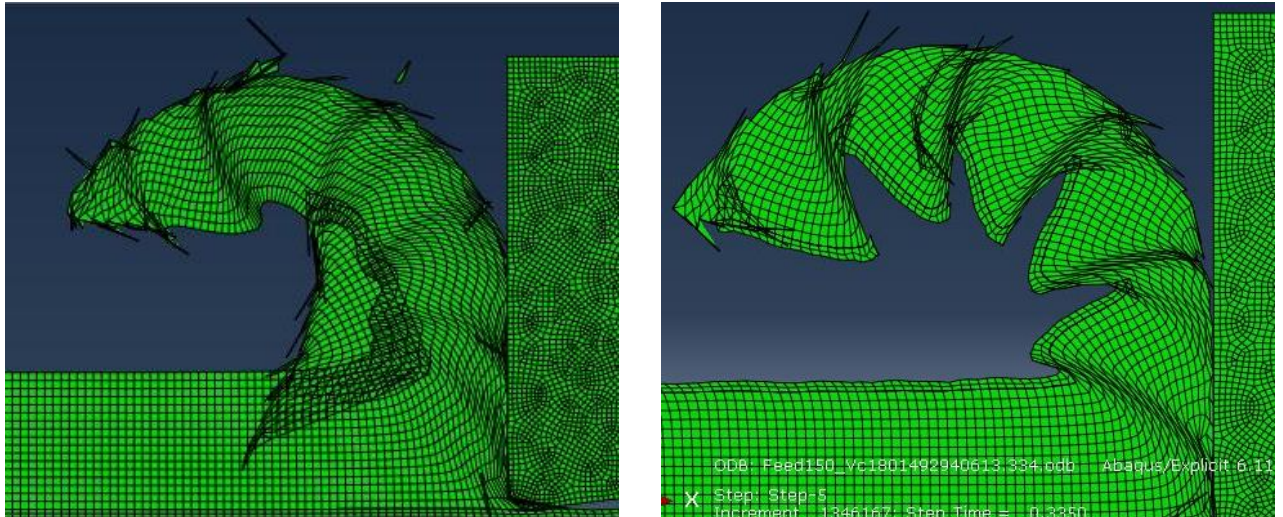


Figura 30 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 180 m/min.

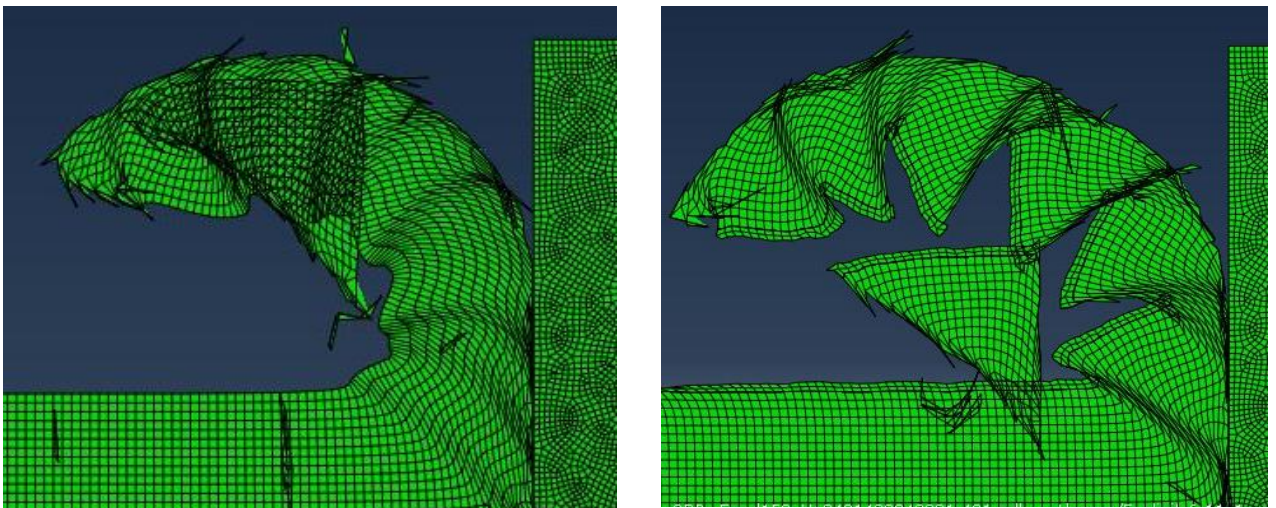


Figura 31 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 240 m/min.

Por último, utilizando un valor de 0,15 mm para el avance, para la primera pasada del ensayo la viruta será continua y homogénea para las velocidades de corte de 60 m/min y 90 m/min. Para 120 m/min la viruta comienza a adoptar una geometría más irregular. A partir de la velocidad de corte de 180 m/min la viruta se romperá por su zona inicial. Mientras que, durante la segunda pasada, como en los casos anteriores, la viruta tendrá una forma segmentada o serrada, caracterizada por unos picos muy pronunciados. En este caso se alcanzará la rotura para las velocidades de corte de 180 m/min y 240 m/min.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para concluir, podemos afirmar que la velocidad de corte es un parámetro fundamental en el estudio de la morfología de viruta. Al aumentar la velocidad de corte, aumentará la temperatura en el contacto pieza-herramienta, produciéndose un reblandecimiento del material, disminuyéndose así la resistencia a la deformación. De esta forma, la viruta estará dotada de una morfología inestable y no homogénea, llegando en algún caso a romperse. Al aumentar la velocidad de corte cambia la morfología de viruta de continua a segmentada. Si se hubieran hecho más ensayos a velocidades de corte mayores, se vería una viruta discontinua con un ancho de segmento mucho menor.

4.1.2. Influencia del avance.

A continuación, se adjuntan las imágenes de los ensayos numéricos representativas de la morfología de viruta para estudiar la influencia del avance. Para ello, las figuras se agruparán manteniendo constante la velocidad de corte y variando el valor del avance. Las Figuras 32 y 33 representan la influencia del avance para una velocidad de corte de 60 m/min.

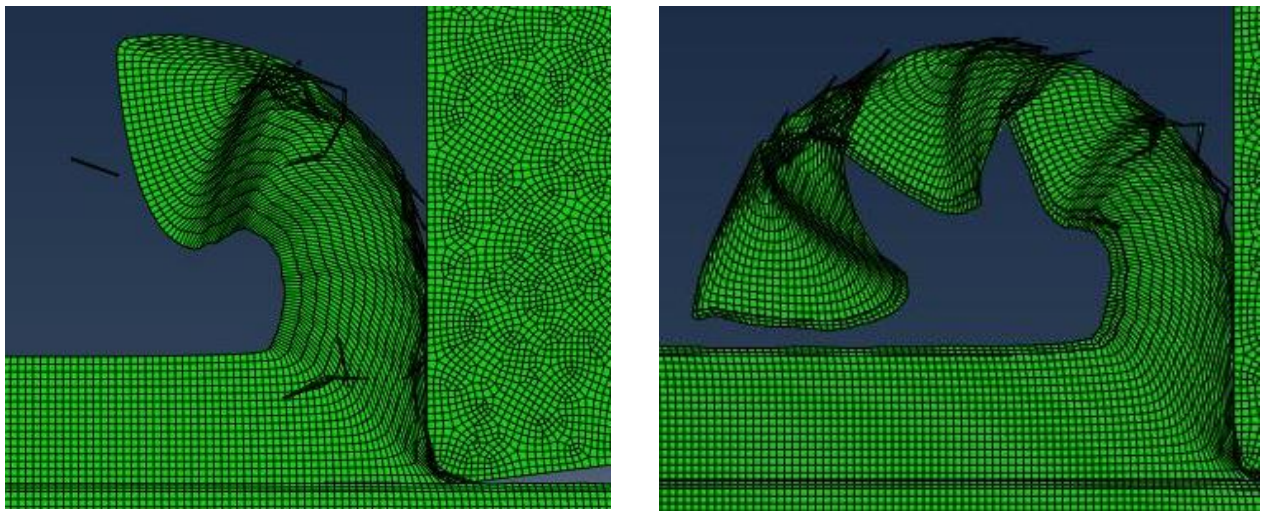


Figura 32 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 60 m/min y un avance de 0,10 mm.

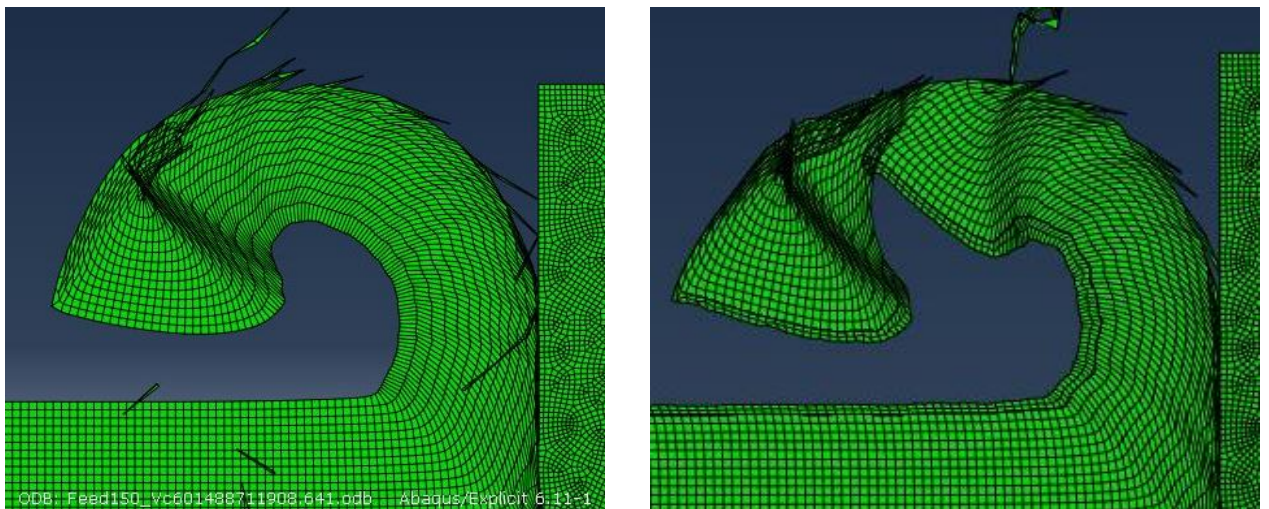


Figura 33 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 60 m/min y un avance de 0,15 mm.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Manteniendo el parámetro de la velocidad de corte constante a 60 m/min, podemos observar que al aumentar el avance la morfología de viruta no varía durante la primera pasada, manteniéndose con una geometría continua y homogénea.

Por otro lado, durante la segunda pasada del mecanizado, la viruta cuenta con una morfología sesgada en la mayoría de los casos ensayados. En el caso del estudio del mecanizado a una velocidad de corte de 60 m/min para un avance de 0,10 mm (Figura 32), la morfología obtenida es homogénea, no presenta dientes, al igual que para un avance de 0,15 mm (Figura 33). Sin embargo, el comienzo de la formación de viruta presenta una morfología serrada la cual, tras la formación de uno o dos picos, se estabilizará y pasará a una morfología continua.

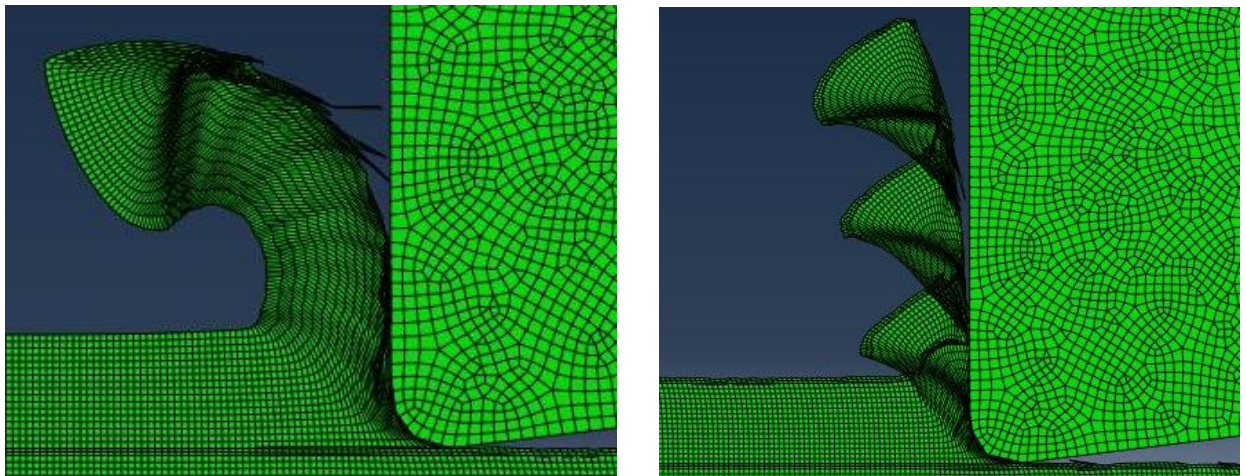


Figura 34 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 0,05 mm.

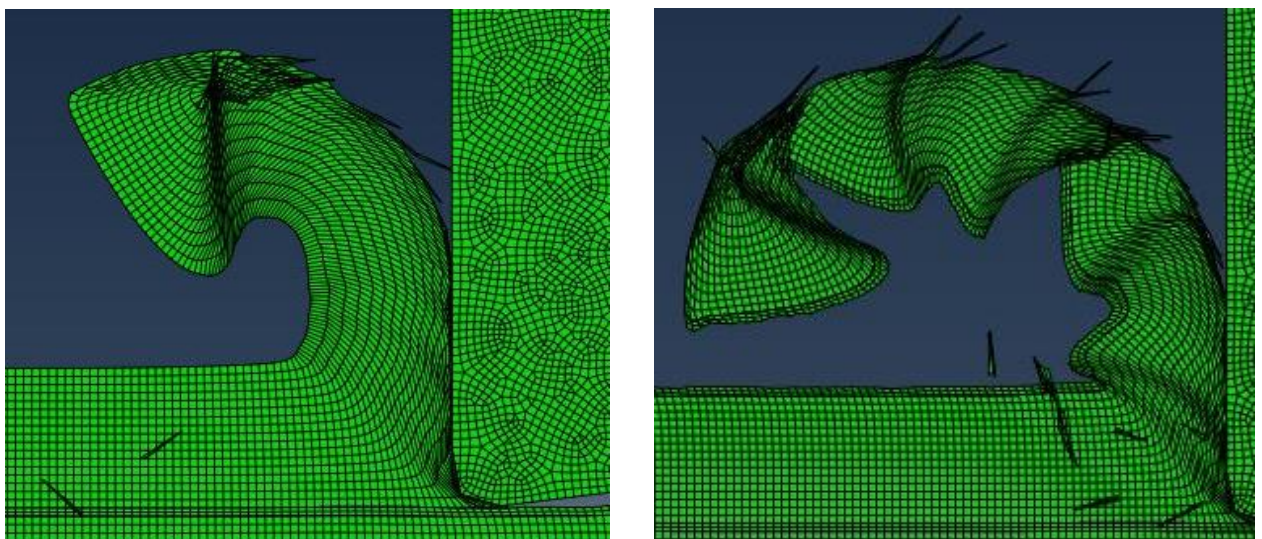


Figura 35 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 0,10 mm.

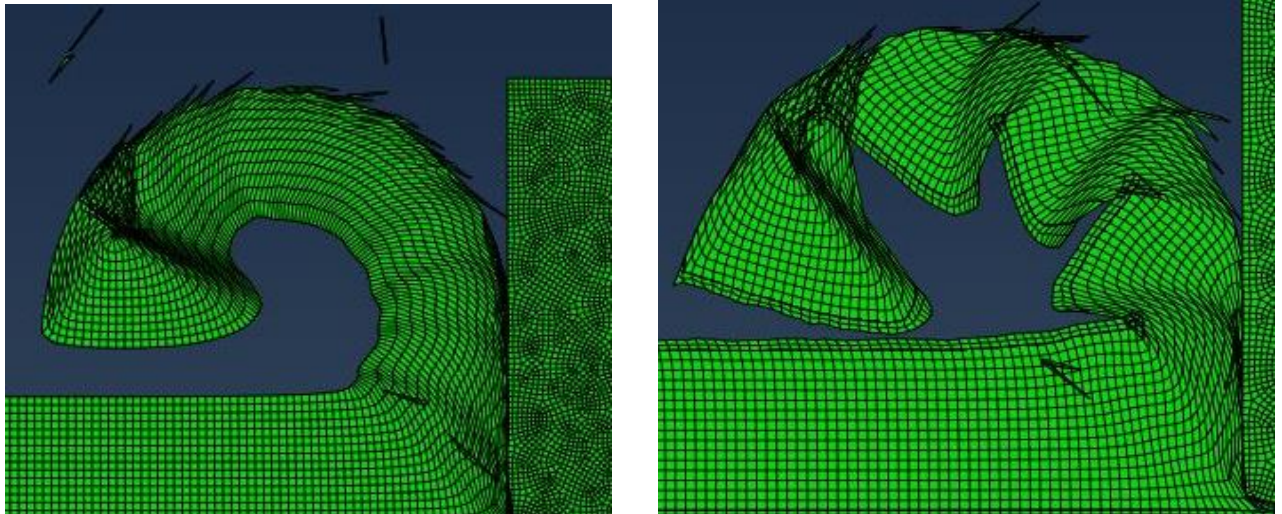


Figura 36 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 0,15 mm.

Para una velocidad de corte constante de 90 m/min, durante la primera pasada la morfología de viruta se mantiene constante y homogénea para los tres valores de avance analizados.

Durante la segunda pasada del mecanizado, la morfología obtenida es homogénea para el valor de avance analizado más pequeño (0,05 mm). Aunque en la Figura 34 se puede observar una morfología serrada, la viruta acaba por estabilizarse a lo largo del corte (Figura 76), por lo que su morfología es catalogada como continua. A medida que aumenta el avance para esta velocidad de corte, la viruta pasa de continua y homogénea a sesgada. Se puede concluir que la combinación de unos valores de avance y de velocidad de corte bajos, da como resultado la obtención de una viruta homogénea, incluso durante la segunda pasada del mecanizado.

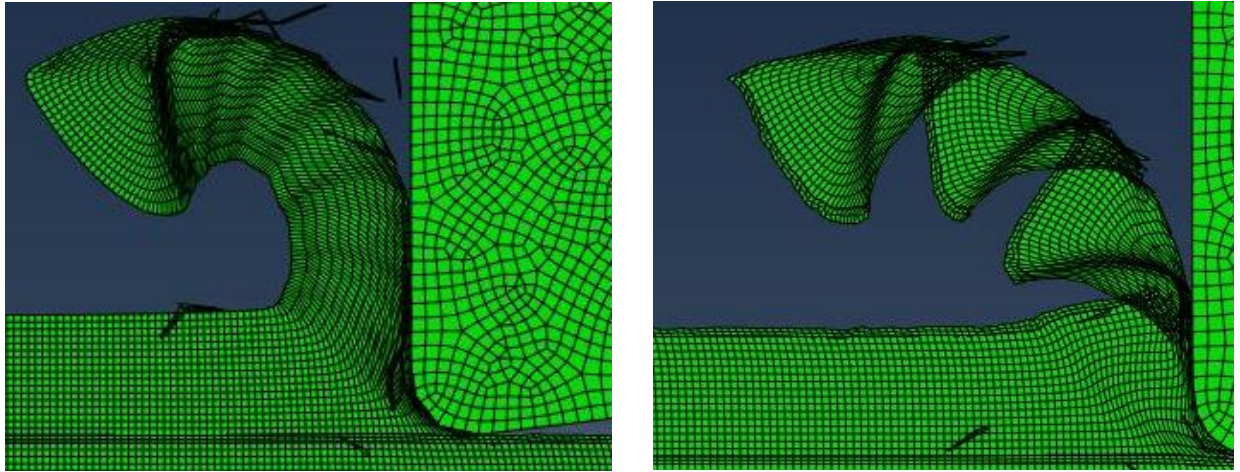


Figura 37 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,05 mm.

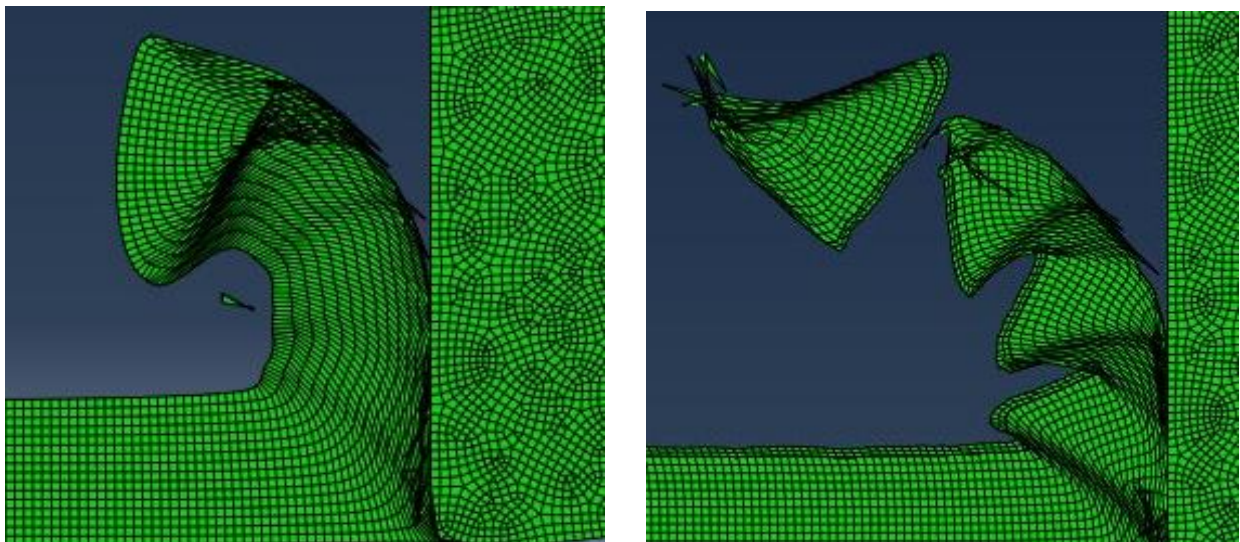


Figura 38 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,10 mm.

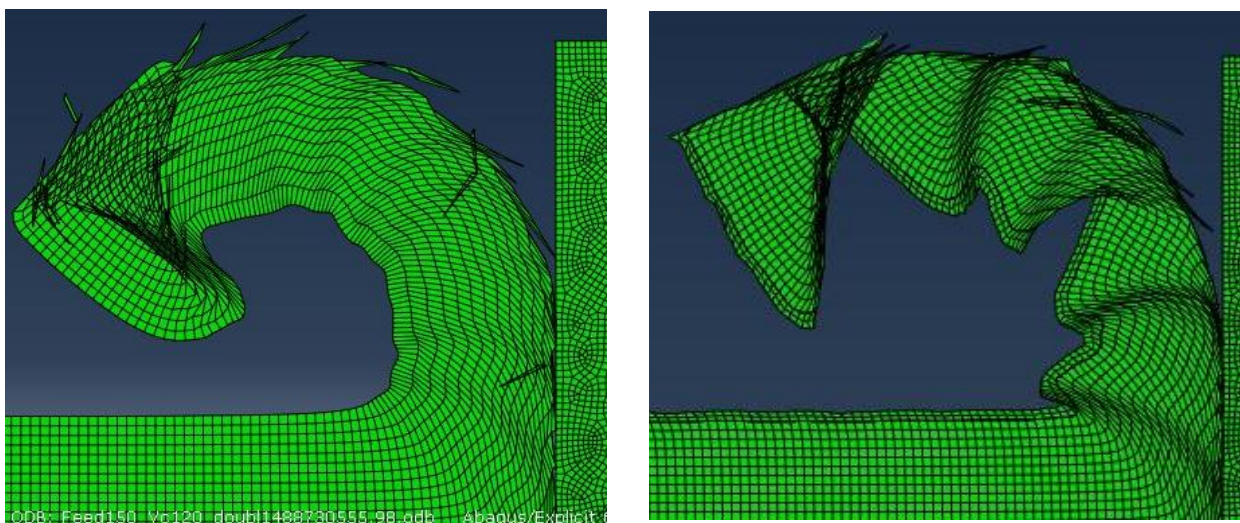


Figura 39 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 120 m/min y un avance de 0,15 mm.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Durante la primera pasada, manteniendo el parámetro de la velocidad de corte a 120 m/min se observa que, al aumentar el avance, la morfología de viruta no varía, manteniendo una geometría continua y homogénea.

Durante la segunda pasada del modelo, al alcanzar la velocidad de corte un valor de 120 m/min, podemos apreciar diferencias entre los distintos avances estudiados, tratándose en los tres casos de morfologías completamente serradas. Para el avance de 0,05 mm, la viruta no llega a su punto de rotura mientras que, para los avances de 0,10 mm y 0,15 mm, la morfología de viruta es discontinua, el primer diente formado se desprende del resto de la viruta.

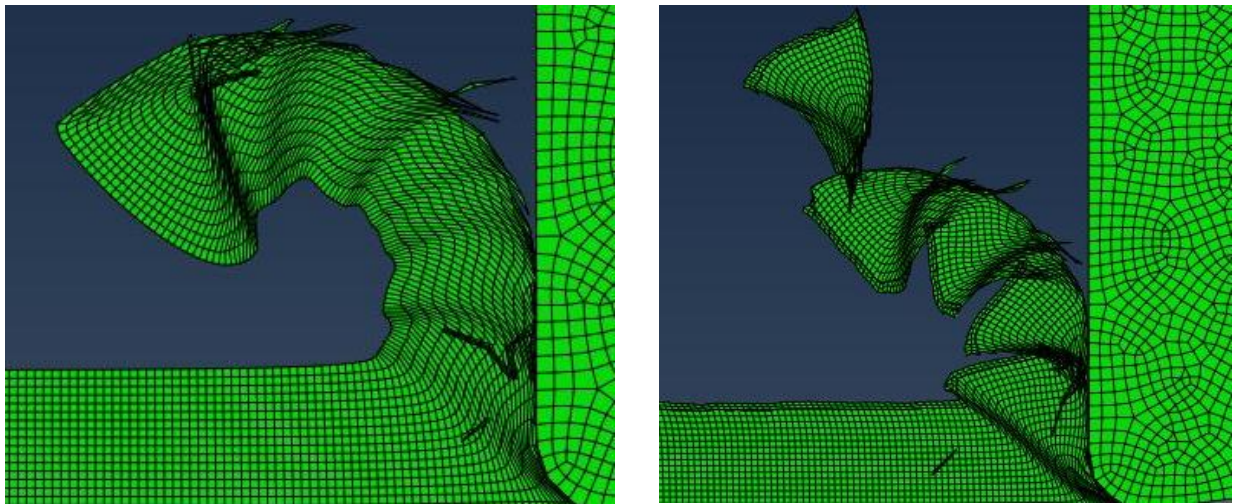


Figura 40 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 180 m/min y un avance de 0,05 mm.

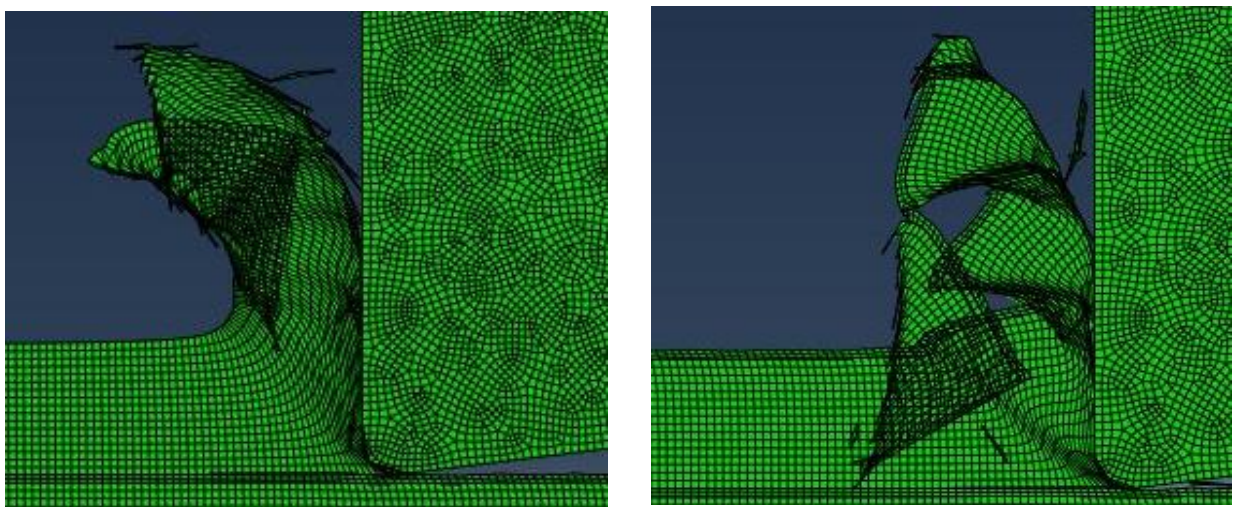


Figura 41 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 180 m/min y un avance de 0,10 mm.

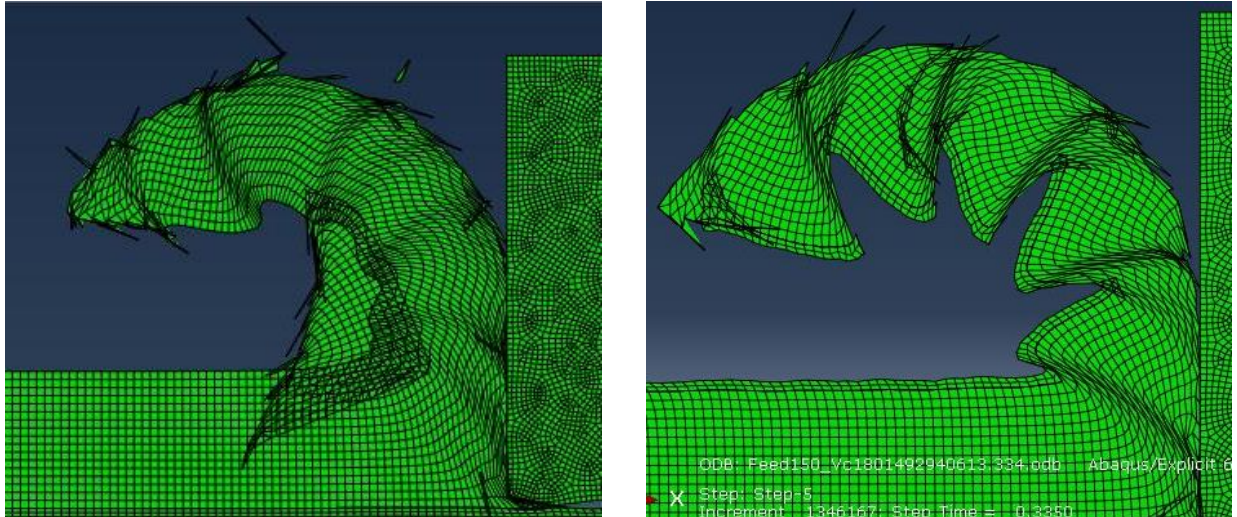


Figura 42 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 180 m/min y un avance de 0,15 mm.

Durante la primera pasada, al alcanzar el valor de velocidad de corte de 180 m/min la viruta deja de ser continua como en los casos anteriores. Se puede observar cómo, para un valor de 0,05 mm, la morfología de viruta es algo serrada, pero sin llegar a romper, mientras que, para valores de avance de 0,10 mm y 0,15 mm, la viruta alcanza su punto de rotura y una parte de ella se separa del resto del material. Para ambos casos, el primer diente es desprendido del resto de la viruta, como puede apreciarse en las Figuras 41 y 42.

Durante la segunda pasada de estos casos, no se apreciará ninguna diferencia en función del avance. En los tres casos la viruta es sesgada y llega a romperse en algunos de sus puntos. Estas discontinuidades serán analizadas más adelante en este mismo capítulo.

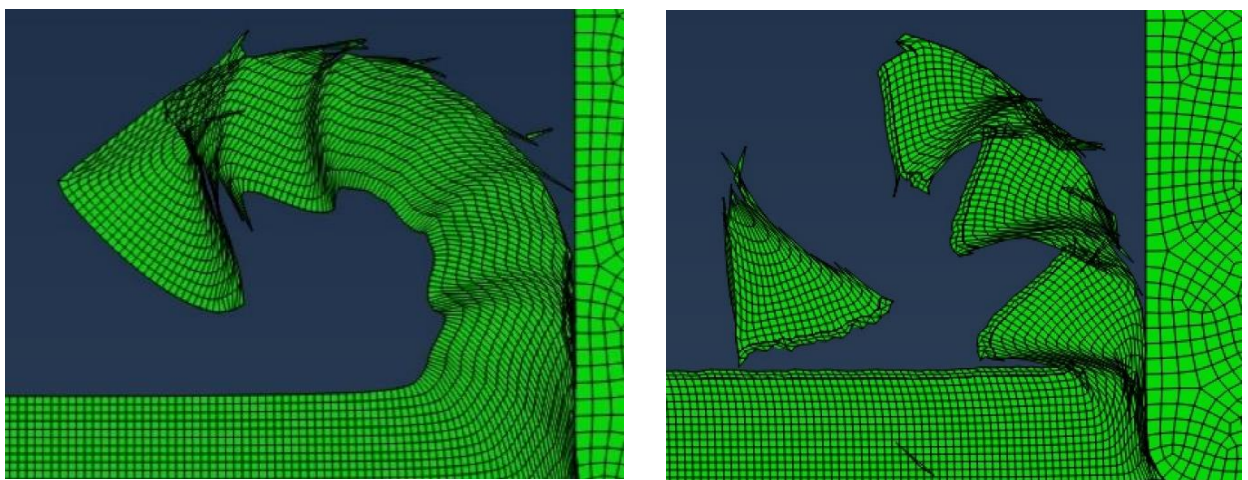


Figura 43 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 240 m/min y un avance de 0,05 mm.

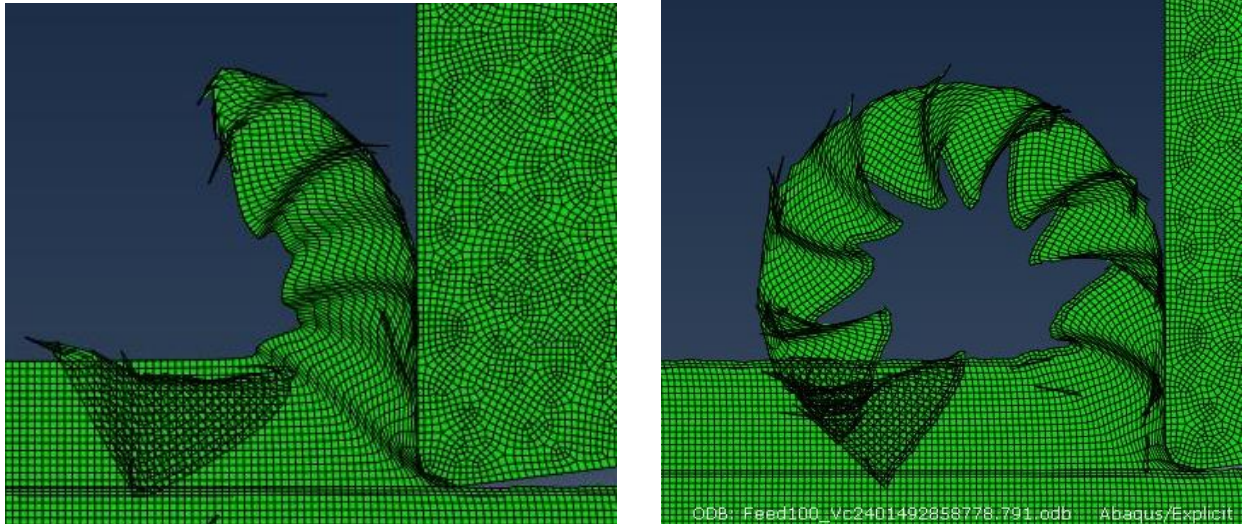


Figura 44 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 240 m/min y un avance de 0,10 mm.

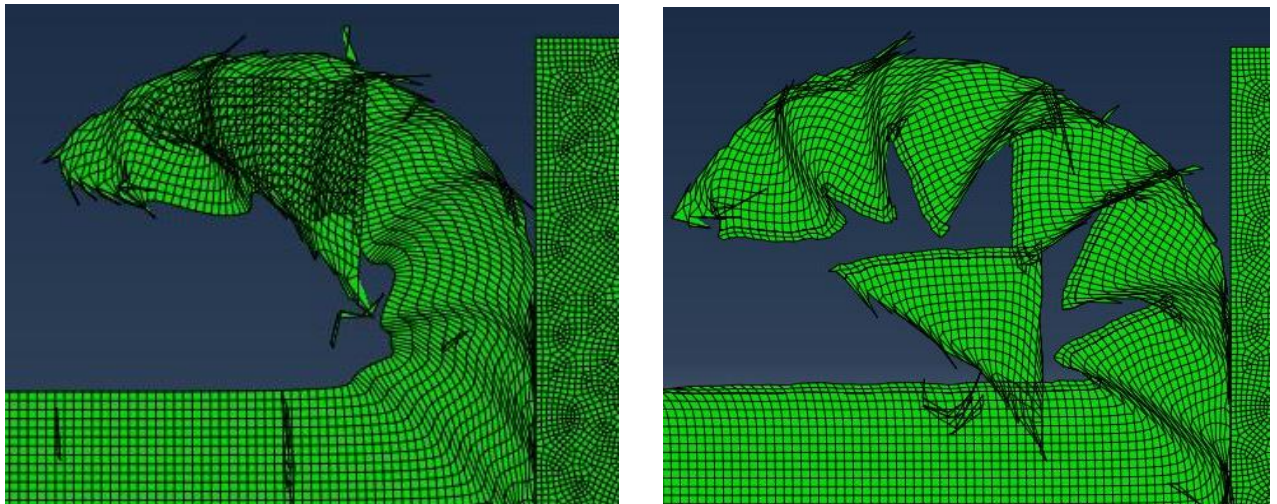


Figura 45 - Morfología de viruta de la 1ª pasada (izquierda) y la 2ª pasada (derecha) para una velocidad de corte de 240 m/min y un avance de 0,15 mm.

La primera pasada de la velocidad de corte de 240 m/min presenta para los tres valores de avance una morfología continua con una pequeña irregularidad. Además, para los tres casos la morfología es discontinua, se desprende el primer y único diente formado. Es decir, no se observa ninguna evolución con respecto a la influencia del avance.

Por otro lado, durante la segunda pasada, al igual que en el caso anterior ($V_c = 180$ m/min), tampoco se aprecia ninguna influencia significativa por parte del avance. Al igual que durante la primera pasada, en los tres casos la viruta alcanza su rotura, aunque, por el contrario, en este caso presentando una morfología sesgada.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Tras el análisis anterior podemos destacar que la influencia del avance en la morfología de viruta es inferior a la de la velocidad de corte. No obstante, también será un parámetro que se deberá tener en cuenta para llevar a cabo este estudio. Al aumentar el avance del mecanizado, la morfología de viruta variará de una morfología homogénea a una morfología serrada. Al igual que en el caso de la velocidad de corte, el aumento del avance dará lugar al aumento de la temperatura del material, lo que provocará el ablandamiento térmico responsable de la deformación plástica de la viruta.

.

4.1.3. Influencia del número de pasadas.

Durante nuestra simulación, se han realizado dos pasadas para cada caso generado a partir de distintos valores de velocidad de corte y avance. Al realizar dos pasadas se podrá realizar un mejor análisis del comportamiento termomecánico del material durante el mecanizado, asemejando la simulación más a la realidad. En las imágenes mostradas en los apartados anteriores, se puede observar la evolución que experimenta la morfología de viruta de la primera a la segunda pasada.

En este apartado se ha estudiado la influencia de dos parámetros de corte y de la segunda pasada del mecanizado. Como se puede observar, el número de pasada es el parámetro más influyente en la morfología de viruta. Aunque se encuentran tendencias y variaciones al variar tanto la velocidad de corte como el avance, la diferencia entre la geometría de la viruta obtenida en la primera pasada y en la segunda pasada es mucho mayor.

Visualmente se aprecia una clara diferencia en todos los casos estudiados entre la viruta homogénea de la primera pasada frente a la segunda pasada, en la cual predomina una morfología serrada. Como excepción, en los siguientes tres casos, durante la segunda pasada del mecanizado, la viruta formada permanece homogénea.

- Avance=0,05 mm y $V_c=90$ m/min.
- Avance=0,10 mm y $V_c=60$ m/min.
- Avance=0,15 mm y $V_c=60$ m/min.

Además, para los casos de avance = 0,10 mm y $V_c = 120$ m/min, avance = 0,05 mm y $V_c = 180$ m/min, y avance = 0,05 mm y $V_c = 240$ m/min, durante la segunda pasada la viruta llega a romperse, mientras que en la primera pasada se mantiene continua.

Tras realizar el análisis se puede apreciar que, para idénticos parámetros de corte, la morfología de viruta contará con características muy diferentes para la primera y la segunda pasada. Debido a las altas temperaturas que se alcanzan en la realización de la primera pasada, durante el mecanizado de la segunda pasada, el material se encontrará con unas propiedades muy distintas a las de su estado inicial. El material queda reblandecido y por lo tanto pierde su resistencia a la deformación. Es por ello por lo que durante la segunda pasada el material se deformará más fácilmente, obteniéndose una morfología sesgada incluso para bajas velocidades de corte.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se analiza la discontinuidad producida en los casos estudiados en este capítulo. Como se puede observar en las Figuras 46, 47, 48 y 49, para el valor de avance de 0,05 mm se consigue una viruta discontinua durante la segunda pasada del mecanizado, favorable para la mejora del mecanizado, como ya se ha mencionado anteriormente. Además, manteniendo fijo el avance, a medida que el parámetro de la velocidad de corte aumenta, la viruta se segmenta en un mayor número de partes.

Para un avance de 0,10 mm, únicamente en el caso de utilizar velocidades de corte elevadas se observa una leve discontinuidad en la morfología de viruta, aunque cabe añadir que esta se presenta tanto en la primera como en la segunda pasada. Esta discontinuidad consiste en el desprendimiento del primero de los picos formados, como se puede observar en las Figuras 51 y 52 a continuación como ejemplo de este tipo de rotura. Todos los casos a los que afecta este tipo de discontinuidad para un avance de 0,10 mm se enumeran en la lista adjuntada a continuación. Como excepción, en la Figura 50 podemos observar que existe discontinuidad, aunque la velocidad de corte empleada en este ensayo sea baja. En este caso únicamente se desprenderá la zona serrada de la viruta, del resto de viruta homogénea.

Para los casos de avance 0,15 mm, la misma discontinuidad que en el caso de las Figuras 51 y 52 se muestra también para altas velocidades de corte, pero en este caso, únicamente durante la segunda pasada. Estos casos se ejemplificarán en la Figura 53.

Los casos que presentan discontinuidad son los siguientes:

- 2ª pasada, avance = 0,05 mm y $V_c = 90$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,05 mm y $V_c = 120$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,05 mm y $V_c = 180$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,05 mm y $V_c = 240$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,10 mm y $V_c = 60$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,10 mm y $V_c = 120$ m/min.
- 1ª pasada, avance = 0,10 mm y $V_c = 180$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,10 mm y $V_c = 180$ m/min.
- 1ª pasada, avance = 0,10 mm y $V_c = 240$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,10 mm y $V_c = 240$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,15 mm y $V_c = 180$ m/min.
- 2ª pasada, avance = 0,15 mm y $V_c = 240$ m/min.

Tras este breve análisis de discontinuidad, podemos afirmar que, para obtener una viruta discontinua favorable al mecanizado, es preferible la utilización de un bajo valor para el avance, ya que este parámetro es altamente influyente en este ámbito. Por otro lado, al aumentar la velocidad de corte, se aprecia una discontinuidad más pronunciada. También se observan un mayor número de casos que presentan discontinuidades durante la segunda pasada con respecto a la primera.

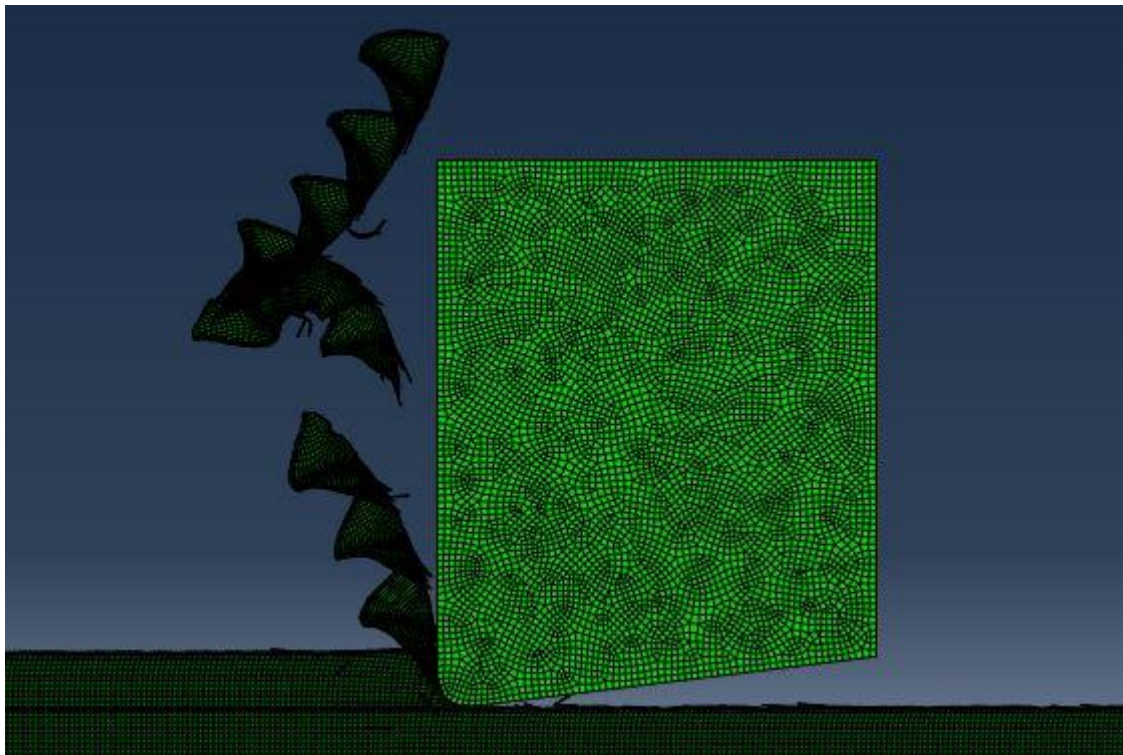


Figura 46 – Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 90$ m/min, 2ª pasada.

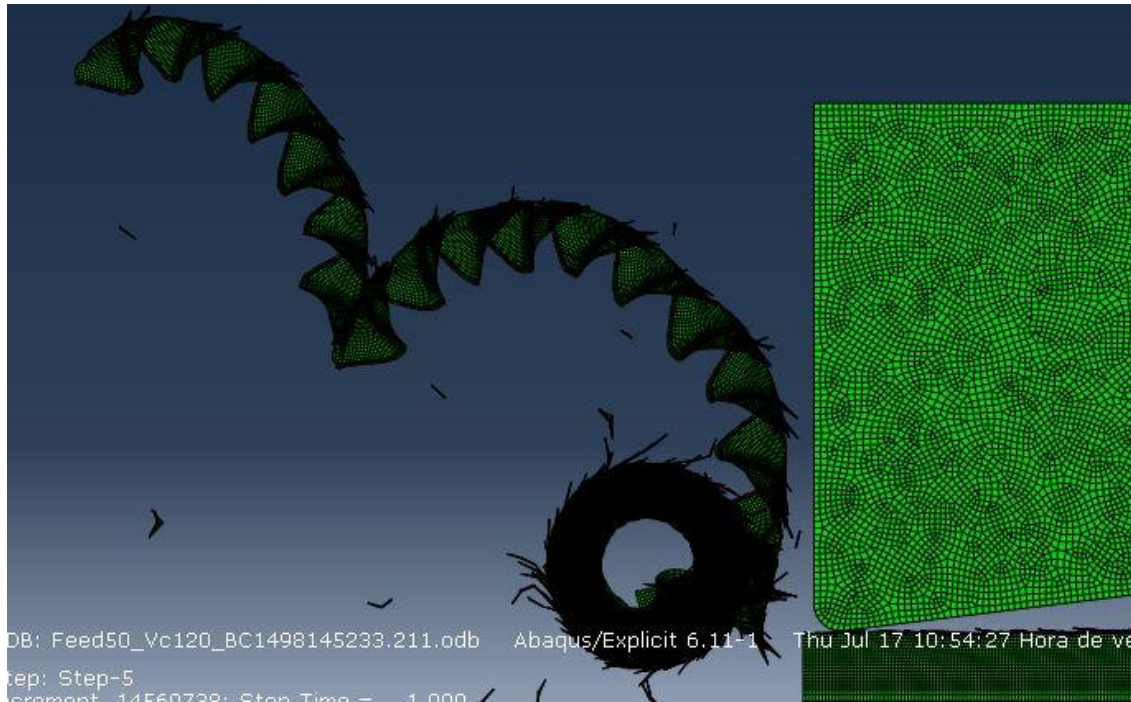


Figura 47 – Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 120$ m/min, 2ª pasada.

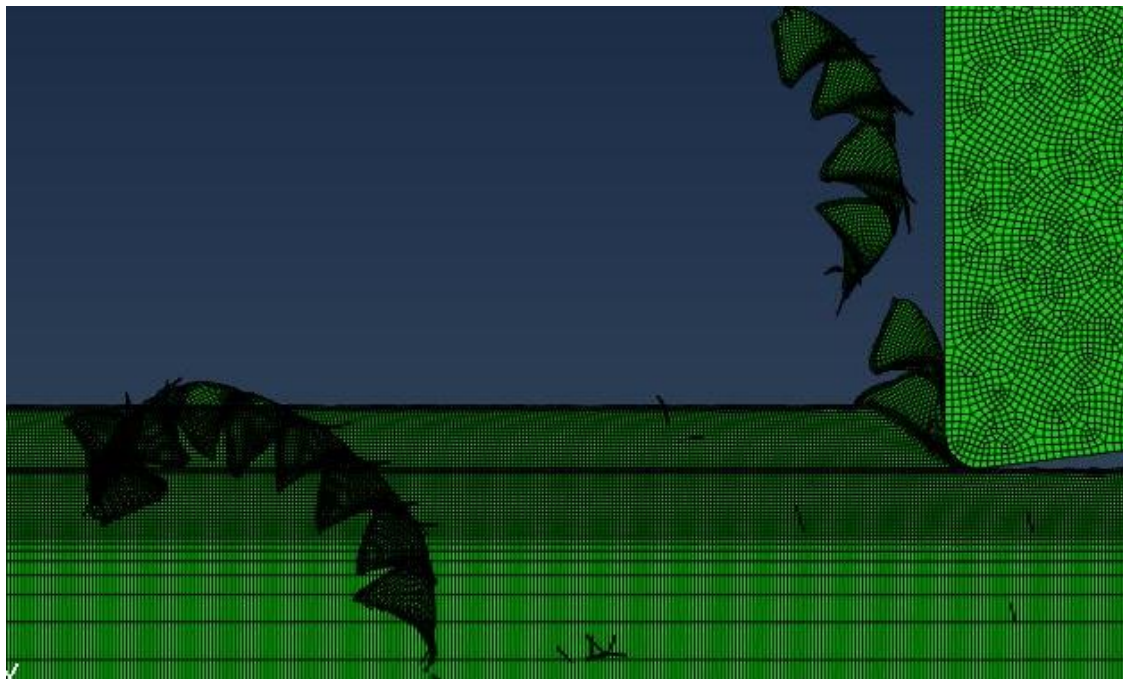


Figura 48 - Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 180$ m/min, 2ª pasada.



Figura 49 – Discontinuidad del caso de avance = 0,05 mm, $V_c = 240$ m/min, 2ª pasada.

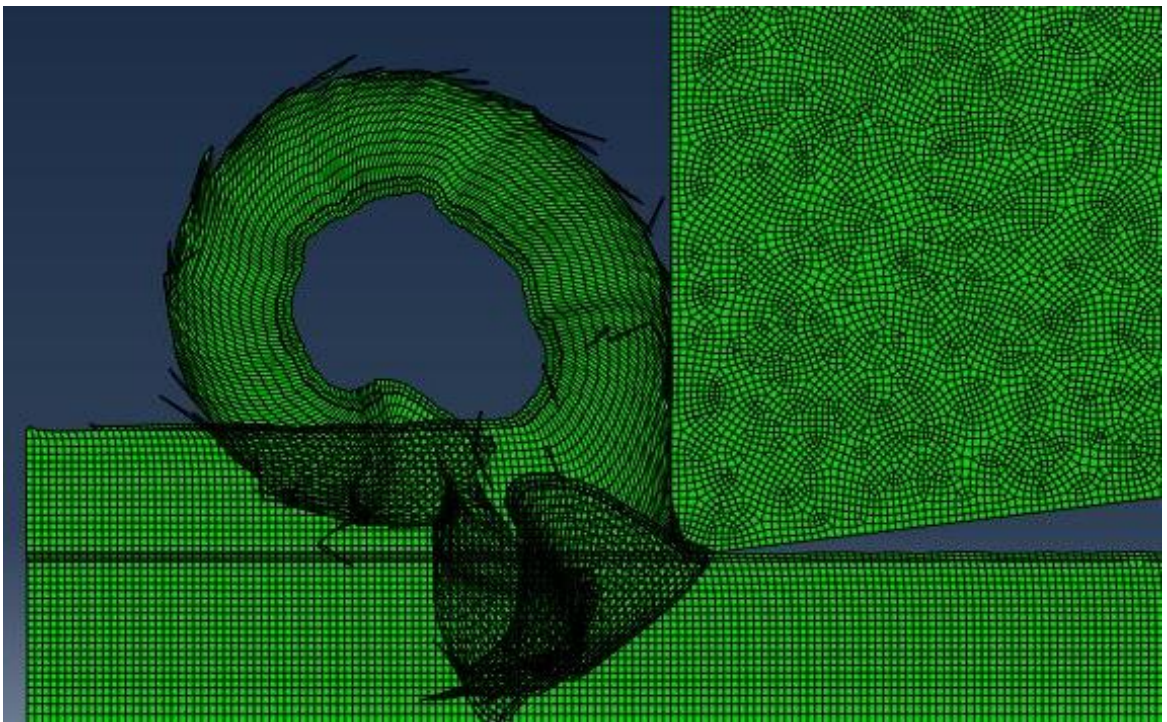


Figura 50 – Discontinuidad del caso de avance = 0,10 mm, $V_c = 60$ m/min, 2ª pasada.

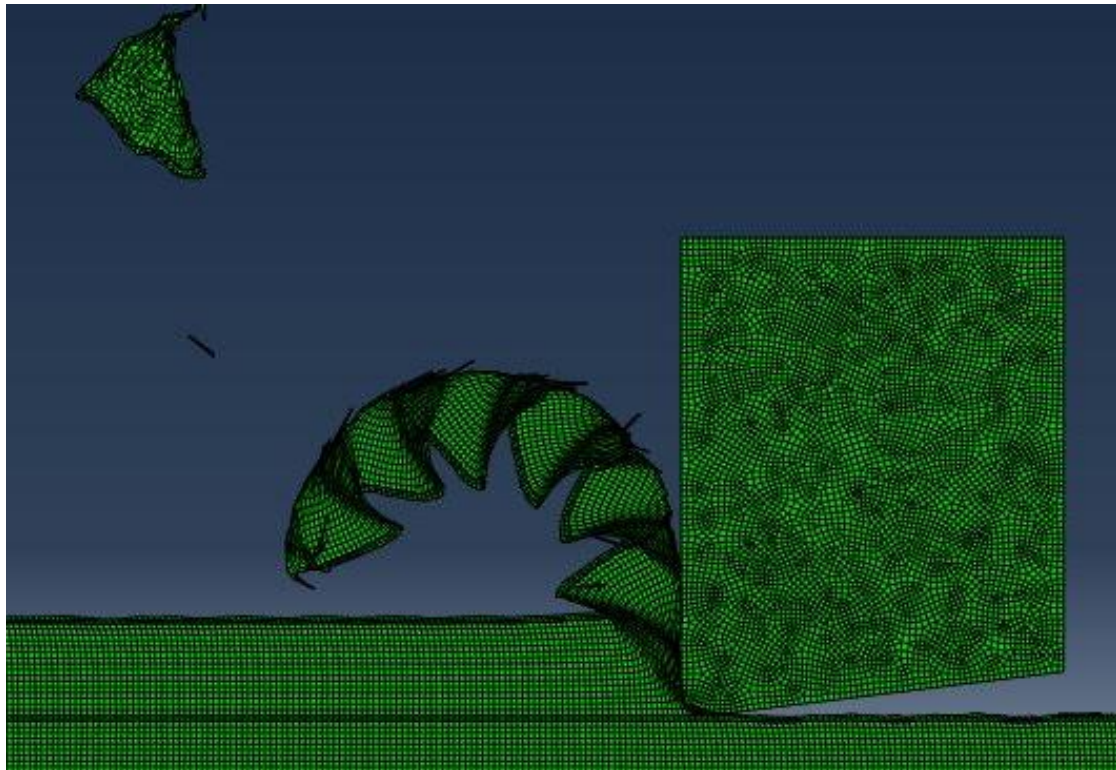


Figura 51 – Discontinuidad del caso de avance = 0,10 mm, $V_c = 120$ m/min, 2ª pasada.

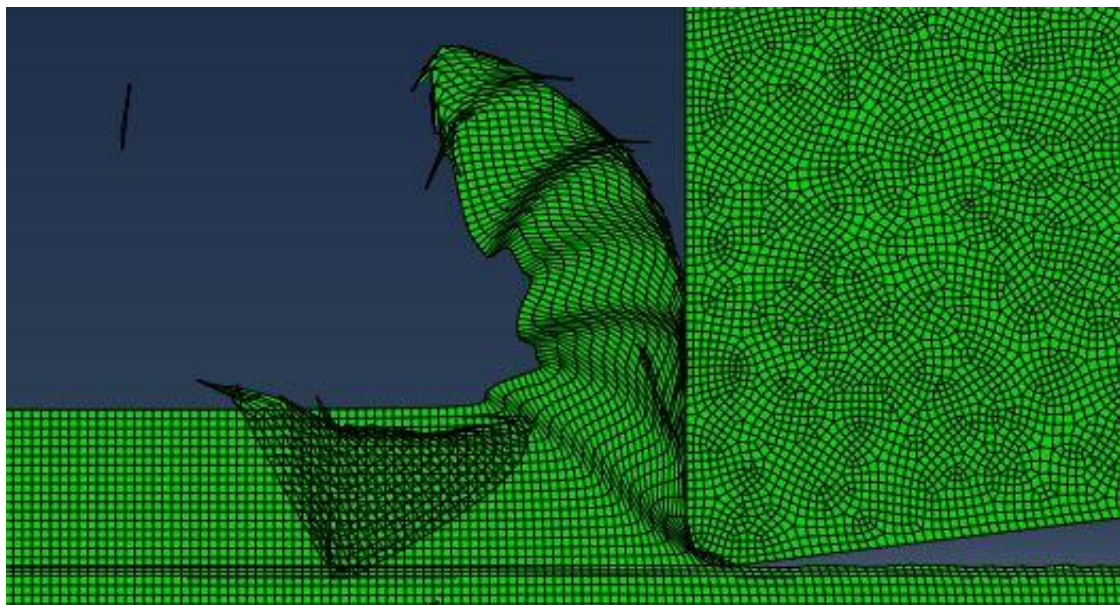


Figura 52 – Discontinuidad del caso de avance = 0,10 mm, $V_c = 240$ m/min, 1ª pasada.

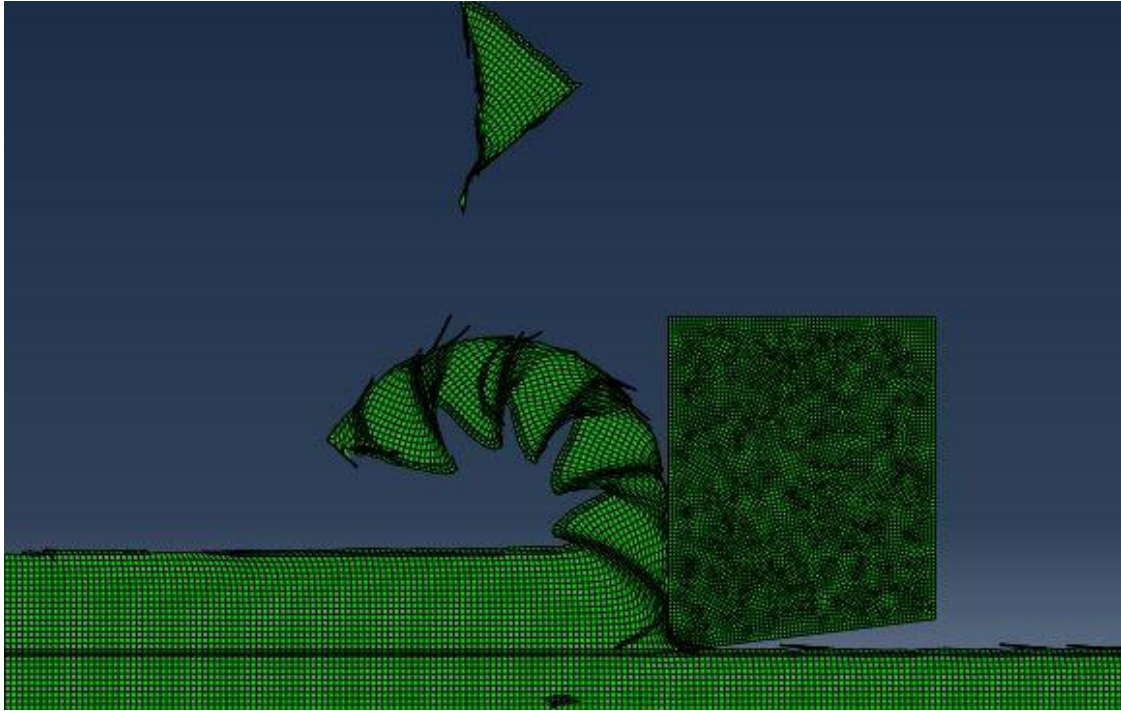


Figura 53 – Discontinuidad del caso de avance = 0,15 mm, $V_c = 180$ m/min, 2ª pasada.

Tras analizar la discontinuidad de la viruta se presentará a continuación un breve análisis de temperatura. El comportamiento de la viruta durante los análisis realizados en el modelo de elementos finitos está relacionado con la variación de la temperatura del material debido a las pasadas previas. La temperatura es una de las magnitudes más importantes en los procesos de mecanizado debido a su gran influencia sobre el material. A continuación, para analizar la tendencia que sigue la temperatura en el modelo numérico, se adjuntan los diagramas de temperatura obtenidos correspondientes a la segunda pasada de un avance de 0,10 mm. Al no haberse realizado ningún estudio de temperatura experimental, los datos del modelo numérico obtenidos no pueden considerarse válidos, aportando estos únicamente una información cualitativa.

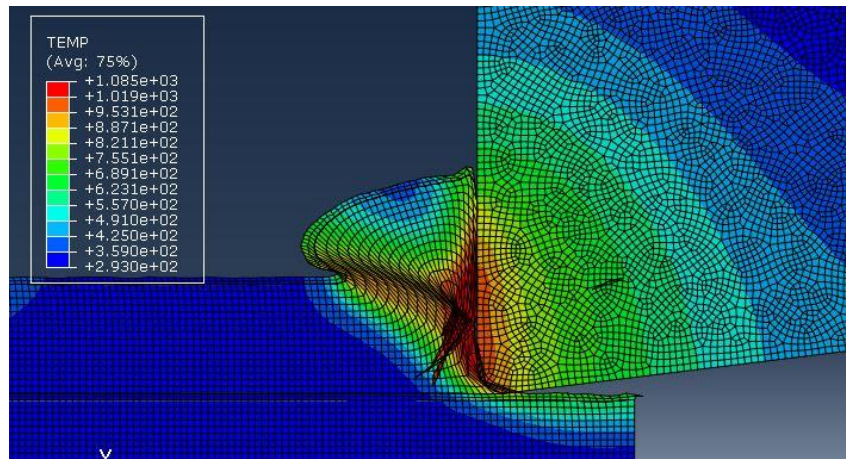


Figura 54 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 60$ m/min.

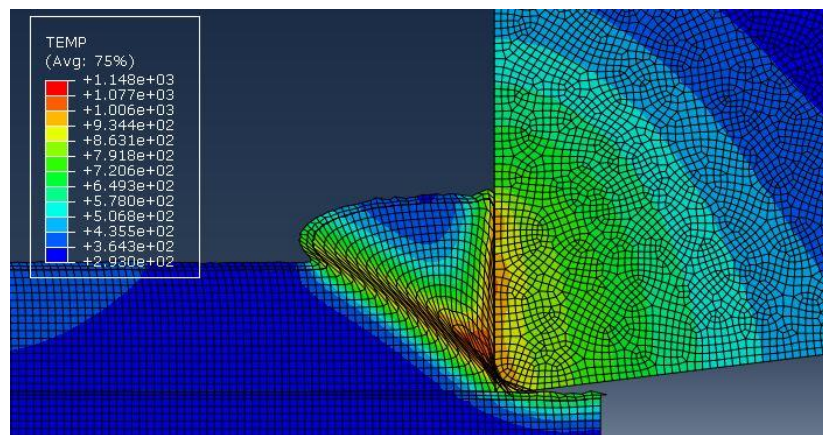


Figura 55 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 90$ m/min.

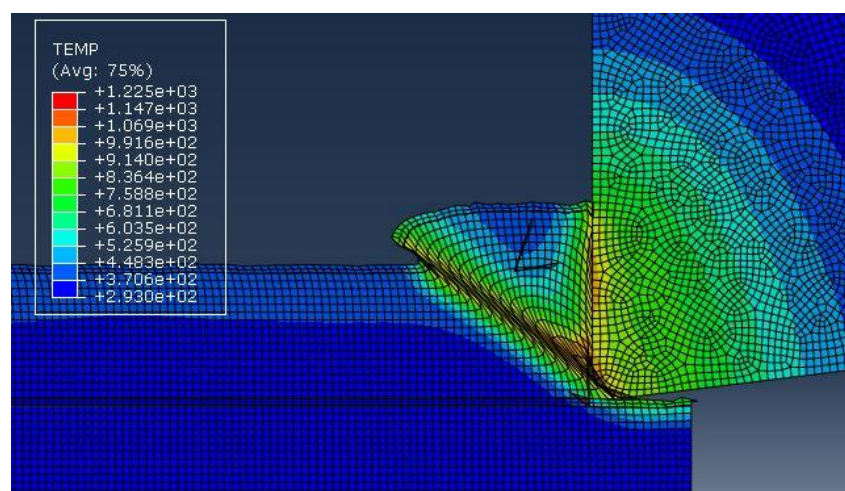


Figura 56 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 120$ m/min.

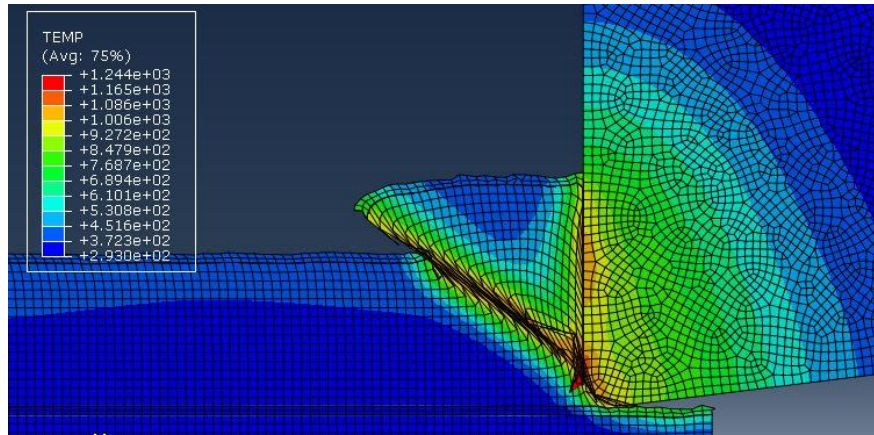


Figura 57 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 180$ m/min.

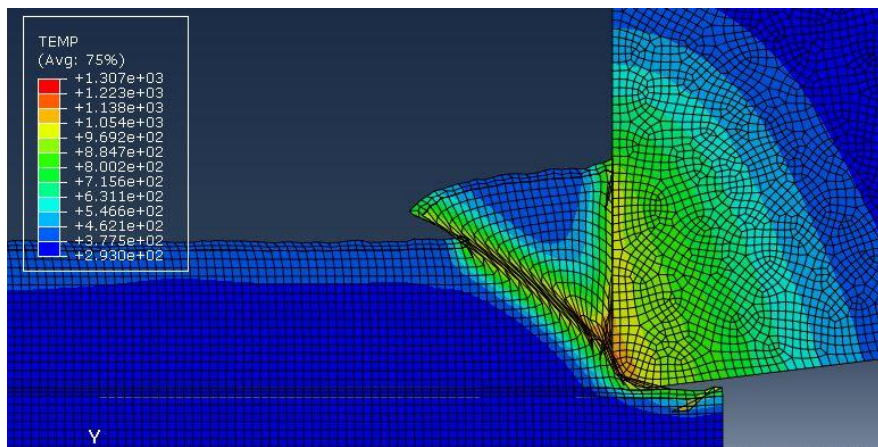


Figura 58 - Diagrama de temperatura de la 2ª pasada del ensayo de avance = 0,10 mm y $V_c = 240$ m/min.

Tabla 6 - Temperatura máxima del modelo numérico para un avance de 0,10 mm en función de la velocidad de corte.

V_c (m/min)	60	90	120	180	240
T (K)	1085	1148	1225	1244	1307

En las figuras anteriores se puede apreciar cómo, dentro de la propia viruta, la temperatura aumenta desde una temperatura ambiente (293 K) a una temperatura superior en la zona de deformación primaria. Además, el valor de la temperatura en la zona de cizalladura aumenta con el aumento de la velocidad de corte y el avance, como se observa en la Tabla 6. Este análisis de temperatura muestra una tendencia que se corresponde con la morfología de viruta obtenida.

Cabe destacar que durante este apartado se ha probado que la morfología de viruta obtenida en la primera pasada del modelo no se corresponde con la realidad, mientras que

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

los datos obtenidos a partir de la segunda pasada sí se corresponden. Es por ello por lo que en el apartado 4.2. se valida el modelo numérico a través de los datos obtenidos de la segunda pasada del mecanizado.

4.1.4. Conclusiones.

En este capítulo se ha presentado un análisis de la morfología de viruta en la 1ª y la 2ª pasada del modelo numérico de elementos finitos, así como la influencia de los parámetros de corte en la misma.

- Se concluye que la velocidad de corte es un parámetro fundamental en el estudio de la morfología de viruta. Como se ha comentado, al aumentar la velocidad de corte cambia la morfología de viruta de continua a segmentada. Esto es debido a que, al aumentar la velocidad de corte, aumentará la temperatura, produciéndose un reblandecimiento del material. De esta forma, la morfología de viruta será inestable y no homogénea, llegando en algún caso a romperse.
- En segundo lugar, el avance se puede considerar otro parámetro de corte que influye en la morfología de viruta, aunque en menor medida que el anterior. Al aumentar el avance del mecanizado, la morfología de viruta variará de homogénea a serrada. Al igual que en el caso de la velocidad de corte, el aumento del avance dará lugar al aumento de la temperatura del material, lo que provocará el ablandamiento térmico responsable de la deformación plástica de la viruta.
- En último lugar, se concluye que durante la 1ª pasada del modelo, la viruta presenta una morfología generalmente homogénea, mientras que durante la 2ª pasada predomina la morfología sesgada. Esto es debido a que el aumento de la temperatura producido durante la 1ª pasada provoca un ablandamiento térmico en el material que repercutirá en la morfología de la 2ª pasada.

4.2. Análisis de la morfología de viruta.

El objetivo de este apartado es la validación del modelo de elementos finitos propuesto para la simulación del mecanizado del Inconel 718. Para ello, los datos obtenidos de la simulación han sido comparados con los valores experimentales correspondientes. Dichos valores experimentales fueron facilitados por la Universidad Carlos III de Madrid en [2].

El análisis de la morfología de viruta se basa en el conocimiento de los diferentes parámetros que caracterizan sus dimensiones y formas, los cuales se explican en el siguiente apartado. Al tratarse de una viruta serrada, los datos experimentales que se han tomado han sido los picos, los valles, el ancho de segmento, el espesor de la banda adiabática de cizalladura y el ángulo de cizalladura. A su vez, para llevar a cabo un análisis comparativo, se ensayaron diferentes condiciones de corte variando la velocidad de corte y el avance. Como valores para el avance se utilizaron 0,05 mm, 0,10 mm y 0,15 mm, y para la velocidad de corte 30 m/min, 60 m/min, 90 m/min, 120 m/min, 180 m/min y 240 m/min.

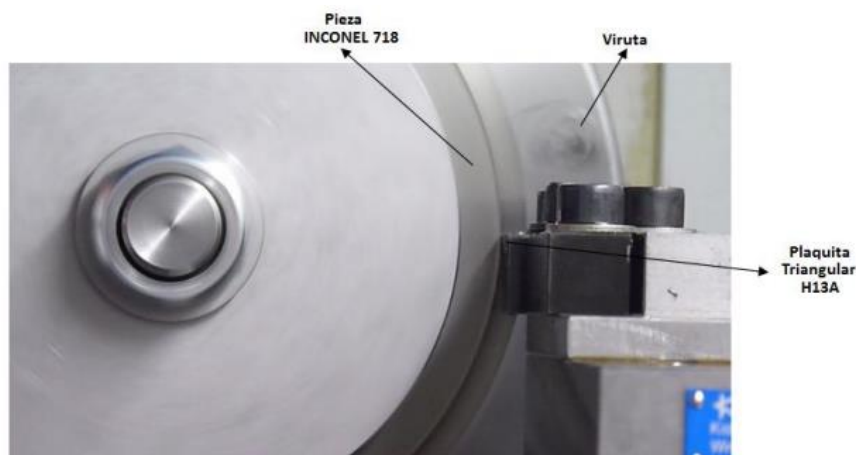


Figura 59 – Esquema del corte ortogonal experimental realizado.

4.2.1. Dimensiones de viruta analizadas.

Para ser capaces de conocer el comportamiento del Inconel 718 en relación con la morfología de viruta durante el mecanizado, es necesaria la medición de las dimensiones de los parámetros morfológicos principales: el pico (t_+), el valle (t_-), el ancho de segmento (w) y el ángulo de cizalladura (α).

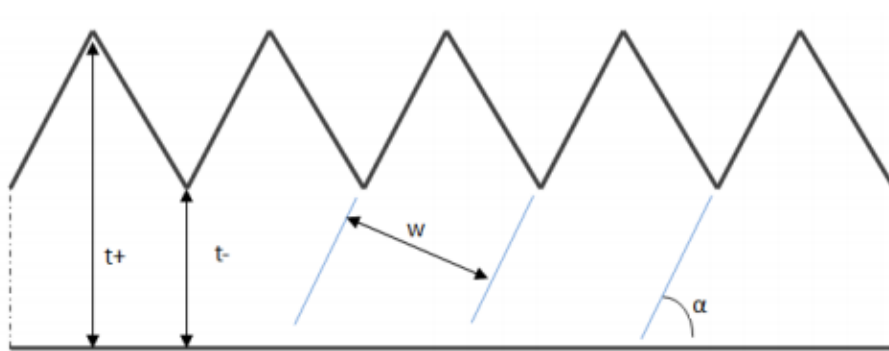


Figura 60 – Esquema general de las dimensiones de viruta.

4.2.1.1. Pico.

El valor de pico (t_+) representa la altura máxima alcanzada por el espesor de viruta. Es decir, se trata de la mínima distancia entre la superficie lisa de viruta y la punta de uno de sus dientes. Este valor es característico de una morfología de viruta serrada, la cual se consigue a altas velocidades de corte y avance.

Como se puede observar en la siguiente imagen, Figura 61, la medida del valor de pico se tomó a través del software Abaqus como una distancia entre dos puntos. Debido al grado de imprecisión que este método pudiera suponer, se tomaron tres medidas distintas para cada caso con el fin de calcular posteriormente la media entre ellos.

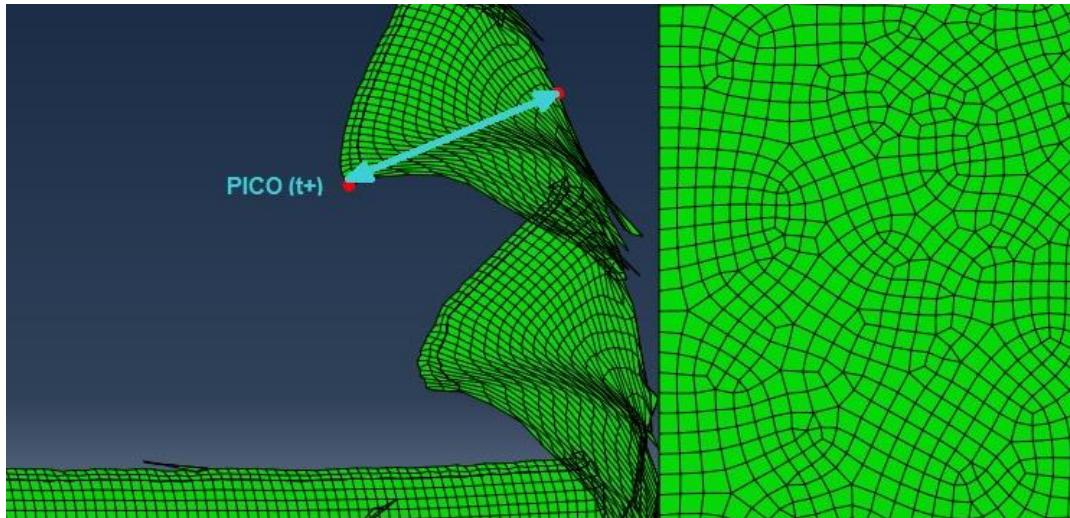


Figura 61 – Pico.

4.2.1.2. Valle.

El valle (t-), al contrario que el valor de pico, se trata del mínimo espesor de viruta. Se define como la mínima distancia entre la superficie lisa y el punto de unión entre dos dientes contiguos. Al igual que en el caso del valor de pico, el valle es un parámetro característico de las virutas de morfología serrada. En el caso de una viruta de morfología continua, el pico y el valle serán iguales entre sí, e iguales a su vez a la dimensión del espesor.

Para llevar a cabo la medición de este parámetro, al igual que en el caso anterior, se utilizó la herramienta *Distancia* entre dos puntos del programa Abaqus. Como para el valor de pico, se tomaron tres medidas de cada caso para el posterior cálculo de su correspondiente media.

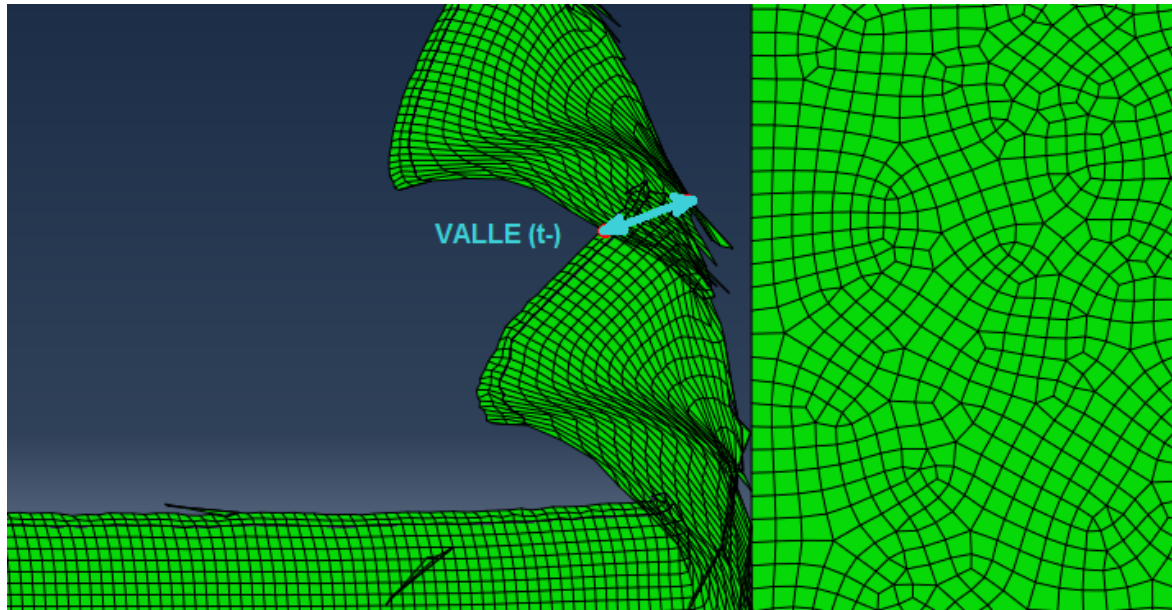


Figura 62 – Valle.

4.2.1.3. Ancho de segmento.

Al igual que en el caso del pico y el valle, el ancho de segmento (w) es una magnitud característica de las virutas serradas, las cuales se obtienen a partir de velocidades de corte y avance altas. Se trata de la mínima distancia entre los flancos paralelos de dos dientes contiguos, medida perpendicularmente a ellos.

A partir de las simulaciones obtenidas se tomaron los valores de ancho de segmento para todos los casos estudiados. Al igual que en los casos anteriores, se tomaron tres medidas distintas utilizando el mismo método, como se indica en la Figura 63.

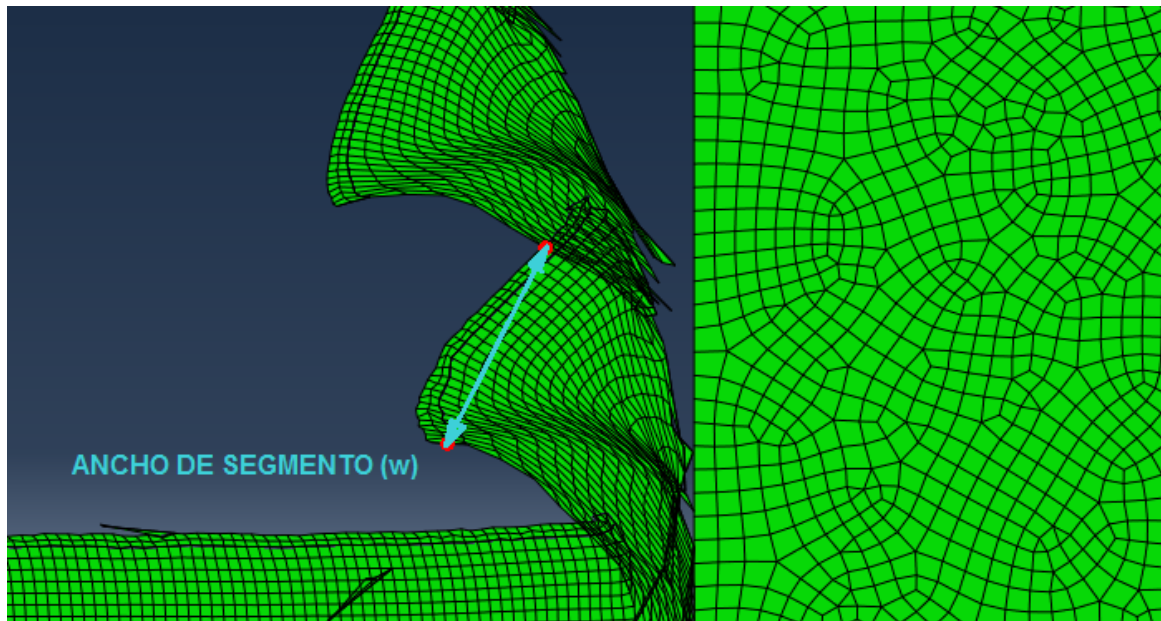


Figura 63 – Ancho de segmento.

4.2.1.4. *Ángulo de cizalladura.*

Para finalizar, el último parámetro morfológico estudiado es el ángulo de cizalladura, característico también de las virutas de morfología serrada. Este ángulo es el formado por la superficie plana de la viruta y el flanco del diente. Por lo tanto, el ángulo de cizalladura indica la inclinación de los dientes de la viruta que forman su morfología serrada.

Las mediciones de este parámetro se realizaron sobre las simulaciones en el programa Abaqus, a través de la herramienta *Ángulo*. La Figura 64 servirá como imagen explicativa de la obtención de este parámetro.

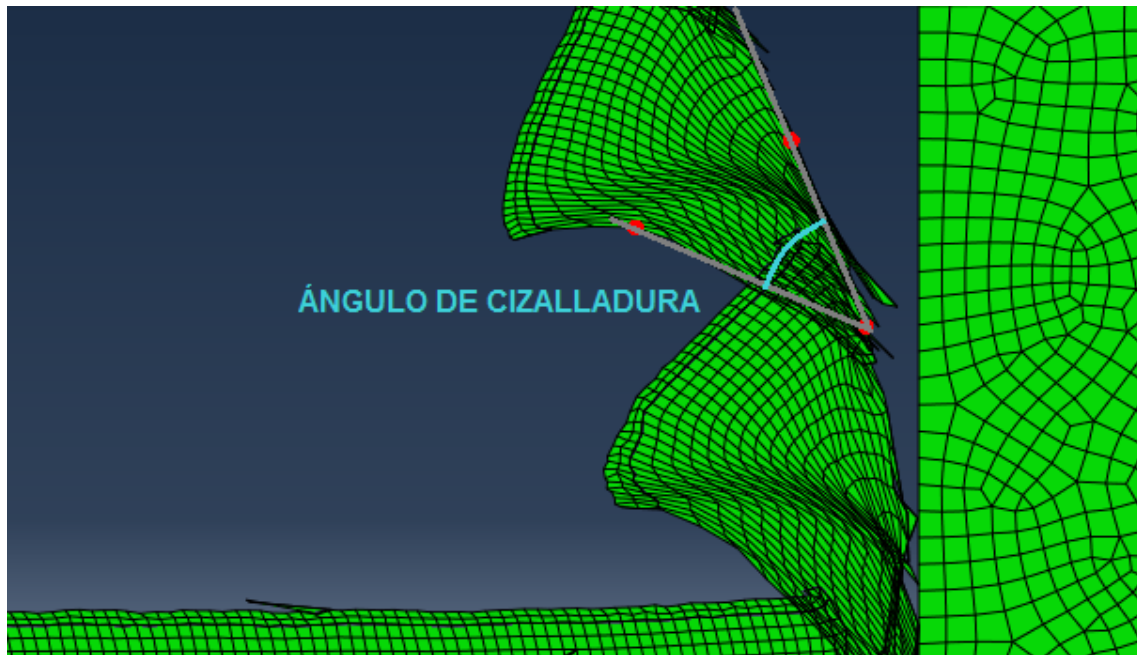


Figura 64 – Ángulo de cizalladura.

Los valores anteriores deben ser calculados sobre una viruta colocada completamente plana. No obstante, sobre la simulación no se pudo alcanzar dicha posición, por lo que los cálculos se realizaron sobre la posición de viruta obtenida durante el mecanizado, como se puede observar en las imágenes anteriores.

4.2.2. Ensayos experimentales.

Todos los ensayos del trabajo correspondiente a [2] fueron realizados en el torno de control numérico Smart-turn 6/260 de la Universidad Carlos III de Madrid, en condiciones de corte ortogonal, sin taladrina y con plaquitas triangulares H13A. Para realizar las mediciones correspondientes de los 15 casos enumerados anteriormente, se llevaron a cabo 43 ensayos.



Figura 65 – Torno de control numérico Smart-turn 6/260 de la Universidad Carlos III de Madrid.

Durante la realización de los distintos ensayos se recogió y guardó la viruta obtenida para posteriormente ser limpiada y tratada con el fin de obtener los parámetros deseados. Para poder medir las virutas obtenidas durante los ensayos sin errores fue necesario que adoptaran una posición completamente plana, uniforme y un pulido especular. Es por este motivo por el que se realizó un incluido metalográfico a partir de un trozo de viruta recortado de aproximadamente 1 cm de largo.

Una vez concluido el incluido metalográfico se llevó a cabo lo que se denomina pulido metalográfico. Este consta de tres fases: desbaste grueso, desbaste fino y pulido. El desbaste grueso se encarga de eliminar las primeras capas de material, posiblemente dañado durante el incluido metalográfico. El desbaste de fino tiene como finalidad conseguir una superficie plana y lisa. Por último, se pulirá la muestra con Alúmina (Al_2O_3).

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para revelar la microestructura de las virutas recogidas, estas fueron sometidas a un ataque químico utilizando agua regia (mezcla homogénea de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado).

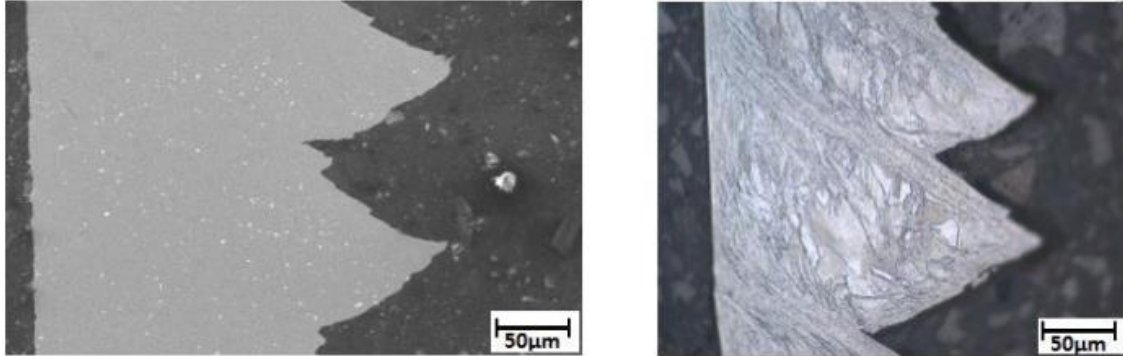


Figura 66 – Muestras pre-ataque químico y post-ataque químico de los ensayos experimentales.

Una vez finalizada esta serie de tratamientos, el material está preparado para llevar a cabo las mediciones necesarias. Estas medidas fueron realizadas sobre las fotografías de cada ensayo tomadas a partir del Microscopio óptico SE. Para cada parámetro, en cada uno de los casos estudiados, se tomaron seis medidas diferentes para posteriormente utilizar como valor final el promedio de estos.

Una vez conocidos los datos experimentales de los parámetros morfológicos estudiados en este trabajo [2] (el pico, el valle, el ancho de segmento y el ángulo de cizalladura) se procederá a su comparación con los valores obtenidos a partir del modelo numérico de la segunda pasada del mecanizado del Inconel 718. De esta manera, comenzará el proceso de validación.

Nuestro estudio se centrará en la importancia de la simulación de la segunda pasada del modelo de elementos finitos ya que, como se ha podido observar durante el análisis previo, los resultados correspondientes a la segunda pasada serán los únicos que se asemejen a la realidad.

A continuación, en las Figuras 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74 y 75 se muestra una comparación morfológica entre los ensayos experimentales y el modelo numérico.

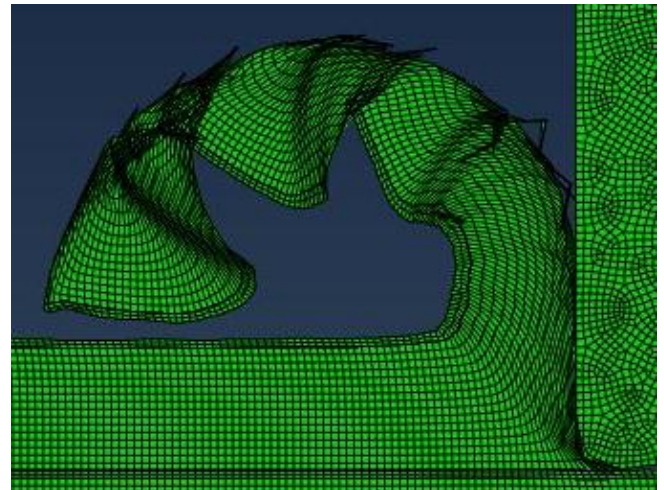
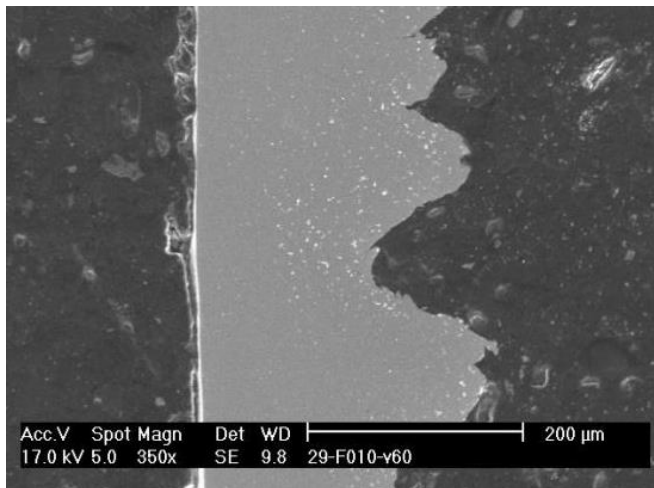


Figura 67 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 60 m/min.

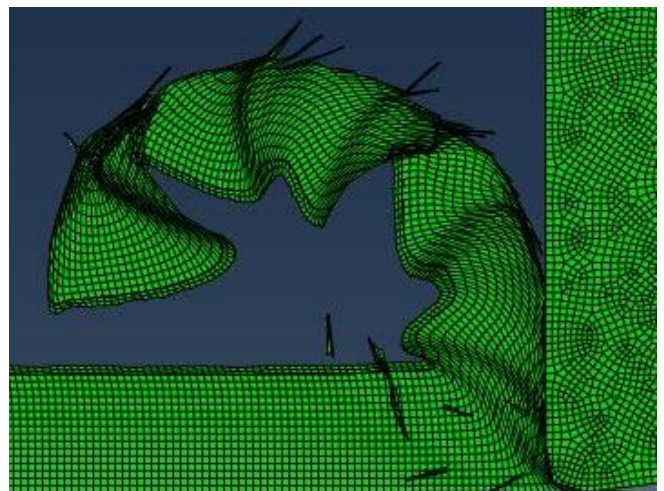
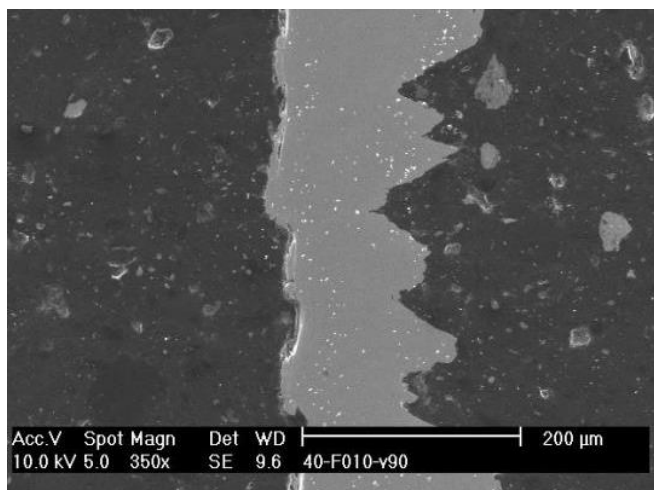


Figura 68 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 90 m/min.

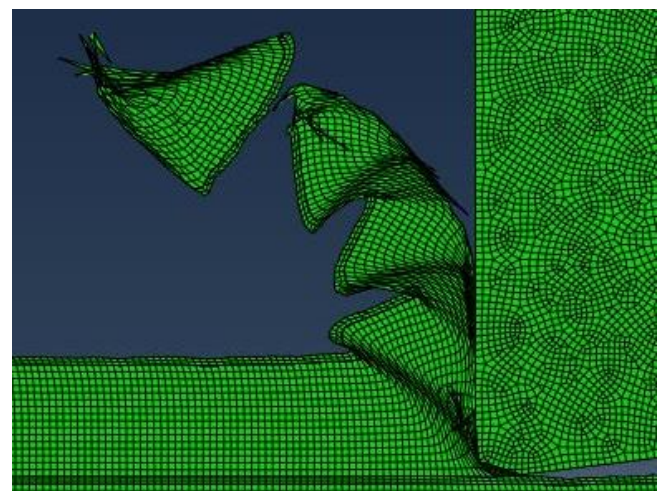
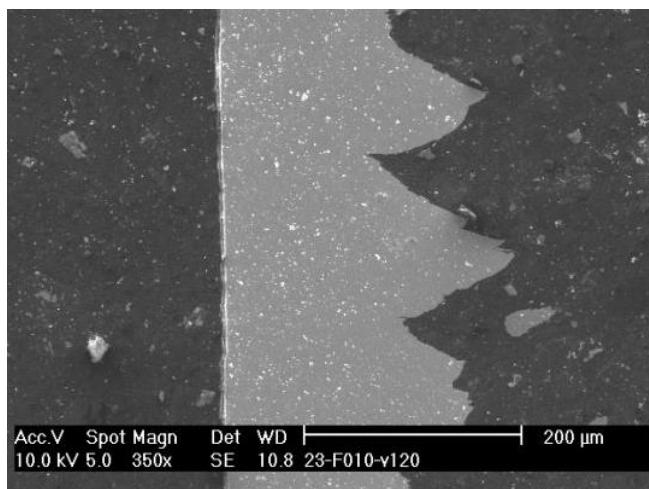


Figura 69 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 120 m/min.

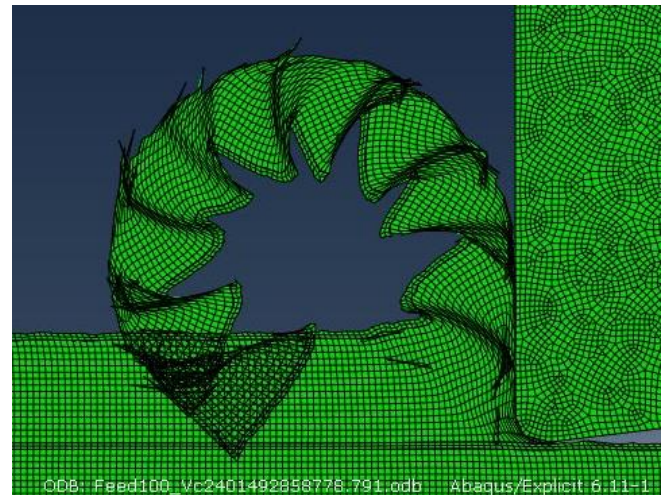
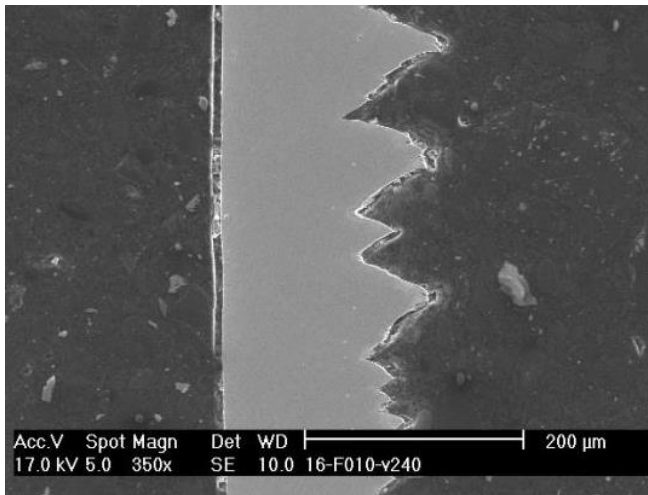


Figura 70 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,10 mm y velocidad de corte 240 m/min.

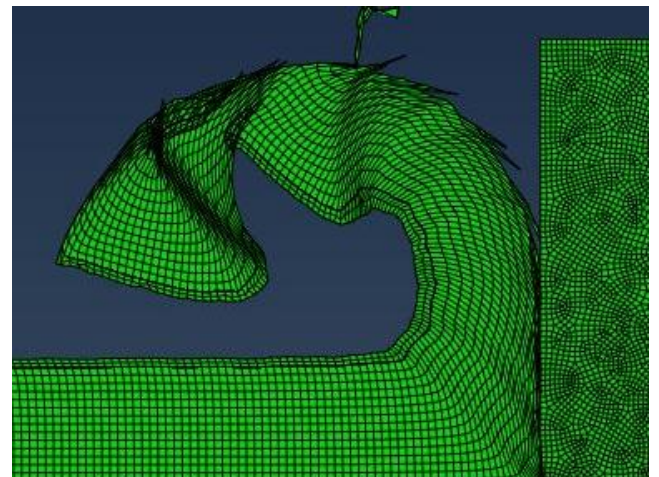
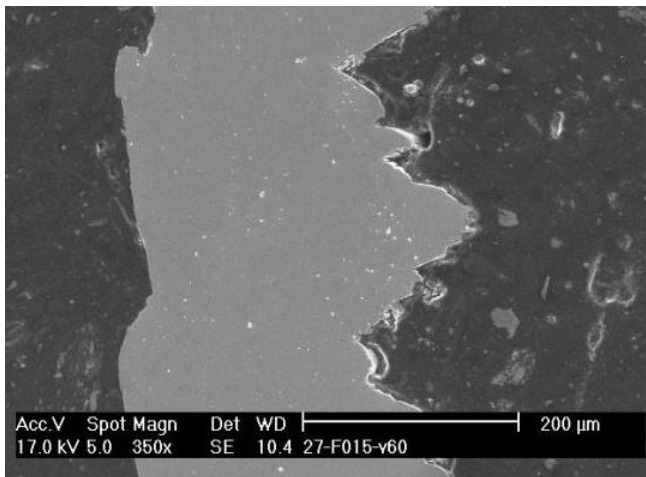


Figura 71 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 60 m/min.

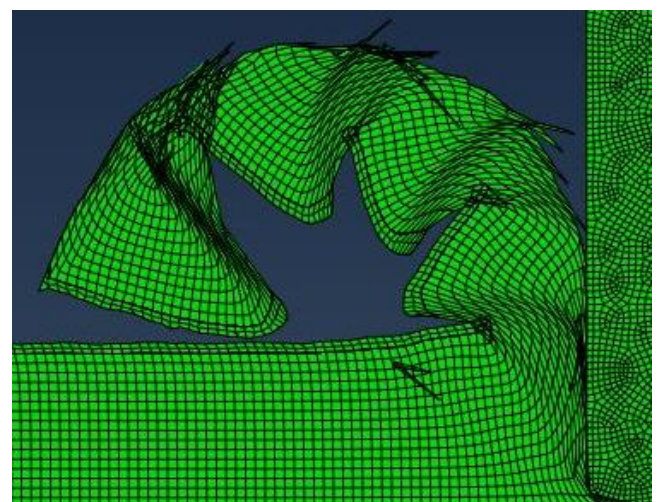
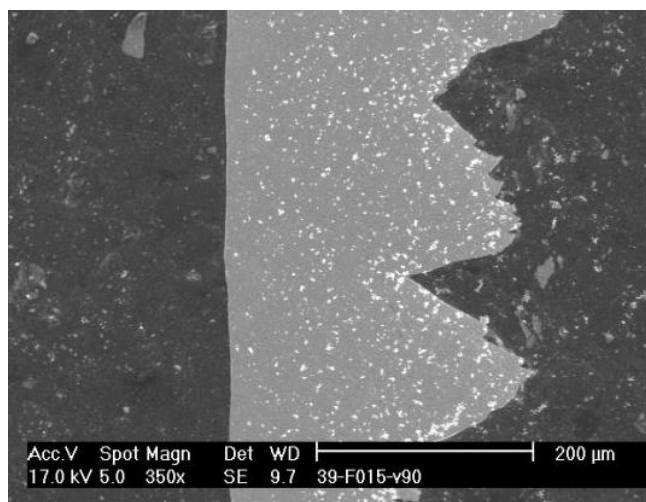


Figura 72 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 90 m/min.

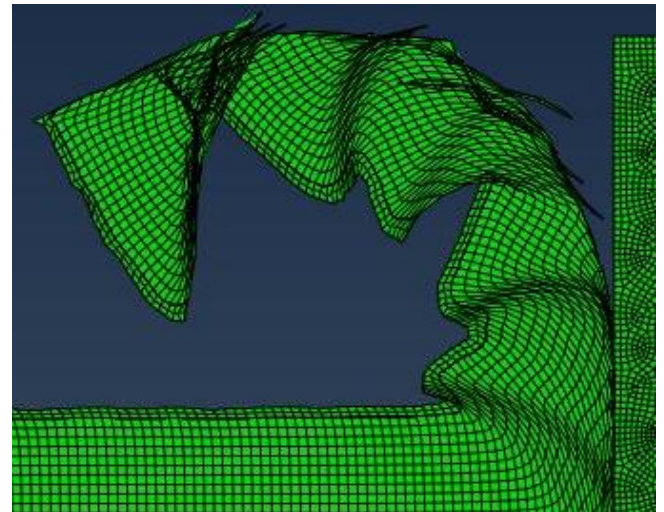
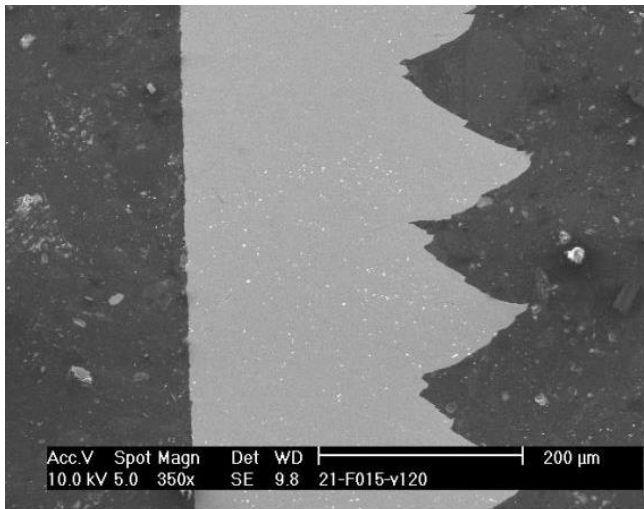


Figura 73 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 120 m/min.

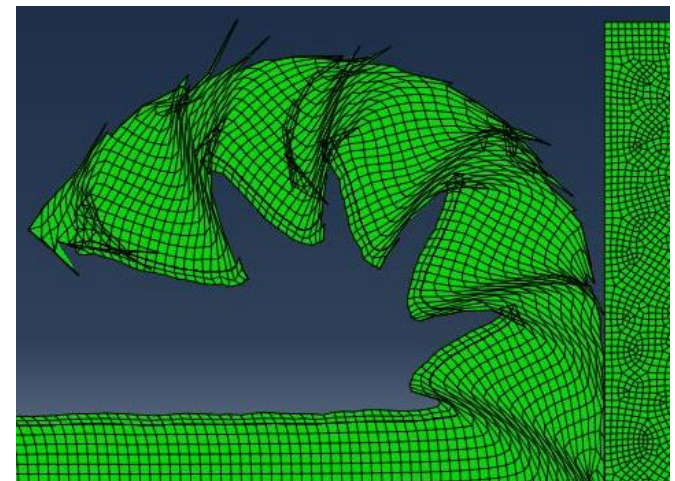
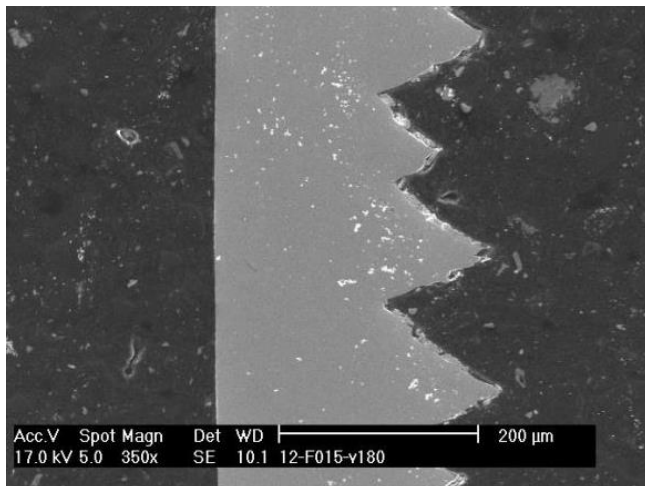


Figura 74 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 180 m/min.

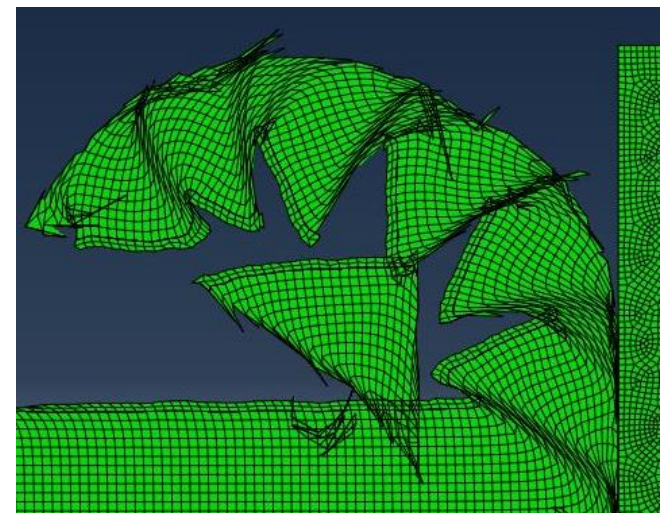
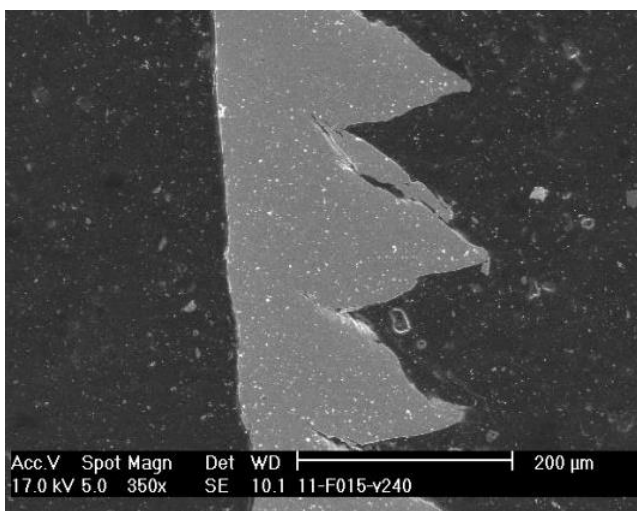


Figura 75 - Morfología de viruta experimental (izquierda) y numérica (derecha) para un avance de 0,15 mm y velocidad de corte 240 m/min.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Como se puede observar en las imágenes anteriores, tanto para los casos experimentales como para los numéricos, la morfología de viruta es principalmente serrada.

Para comparar la morfología de viruta en ambos casos, es necesario observar la cara izquierda de la viruta, es decir, la zona que no se encuentra en contacto con la superficie de desprendimiento de la herramienta de corte. Es esa zona la que se verá más afectada por la variación de los parámetros de corte.

En el caso en el que los parámetros de corte son: avance de 0,05 mm y velocidad de corte de 90 m/min, durante la simulación de esta segunda pasada, la mayor parte del mecanizado proporciona una viruta con una morfología serrada, mientras que la última parte de dicho mecanizado muestra una viruta continua, como se puede observar en la Figura 76. Los datos adjuntados en las siguientes tablas correspondientes a este caso pertenecen a la parte serrada mencionada anteriormente. Experimentalmente la viruta obtenida mediante estos parámetros de corte es considerada continua, por lo que este caso no podría ser tratado como válido.

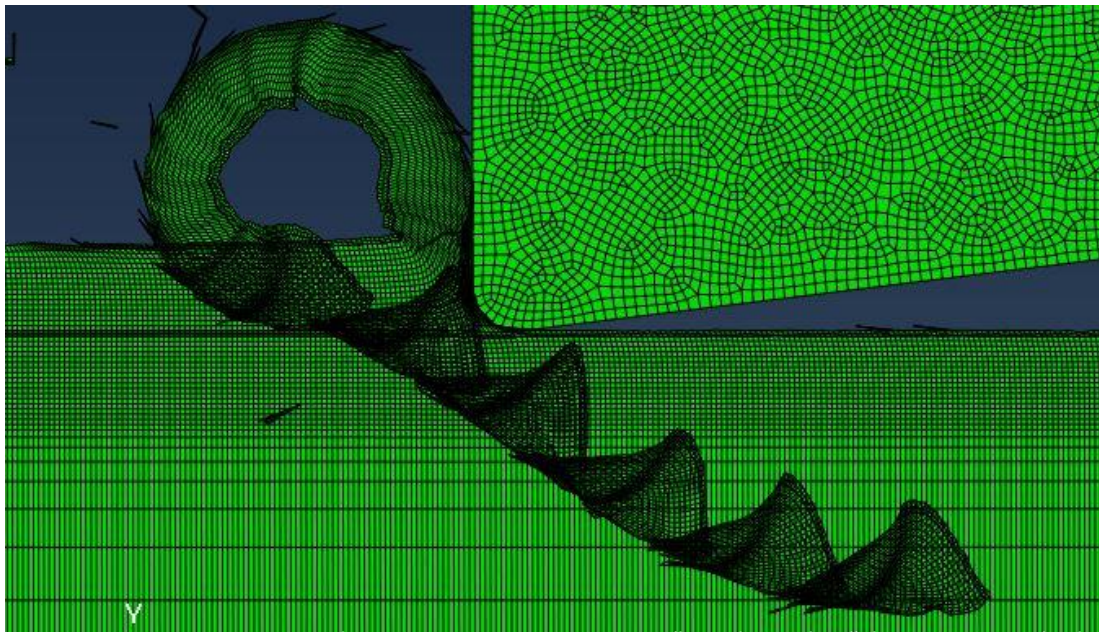


Figura 76 - Continuidad del caso avance = 0,05 mm y Vc = 90 m/min.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Por otro lado, el caso en el que los parámetros de entrada son avance = 0,10 mm y la $V_c = 60$ m/min se obtiene una viruta prácticamente continua, al igual que en los datos experimentales. No obstante, el comienzo de la viruta muestra una morfología serrada que, tras la formación de dos dientes, pasa a una morfología continua. En la Figura 77 puede observarse la evolución de esta morfología. Es por ello por lo que no contamos con datos sobre su morfología (pico, valle, ancho de segmento y ángulo de cizalladura).

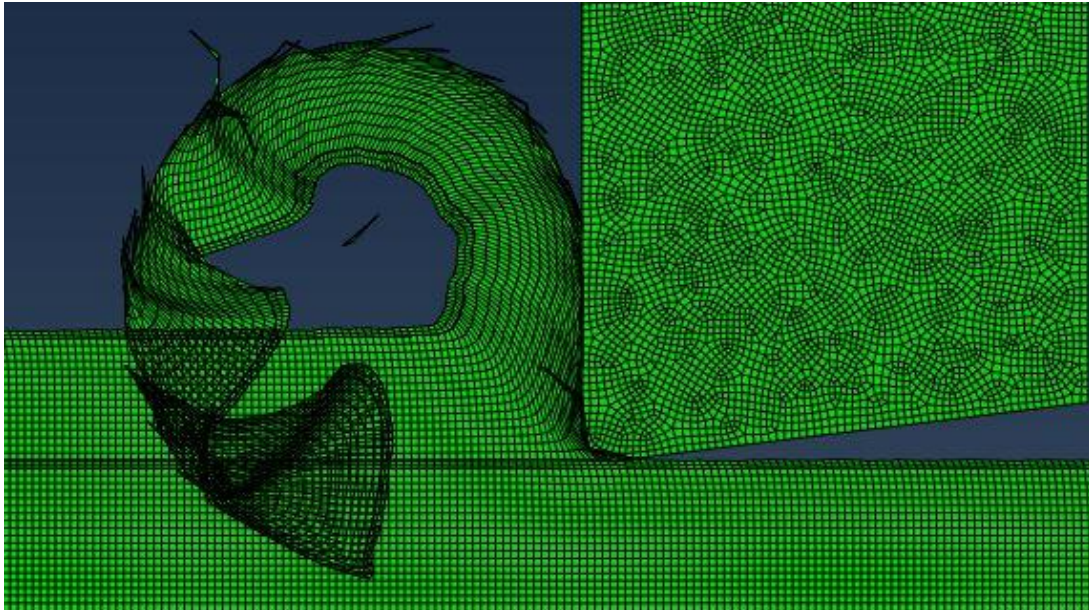


Figura 77 – Continuidad del caso avance = 0,10 mm y $V_c = 60$ m/min.

Por último, en el caso en el que los parámetros de entrada son avance = 0,15 mm y la $V_c = 60$ m/min, se obtiene una viruta prácticamente continua, exceptuando los dos dientes que aparecen al comienzo, al igual que en el caso anterior, Figura 78. En este caso, la continuidad de la viruta no coincide con los datos experimentales, en los que la viruta se cataloga como serrada. Es decir, este caso no se aproxima a la realidad.

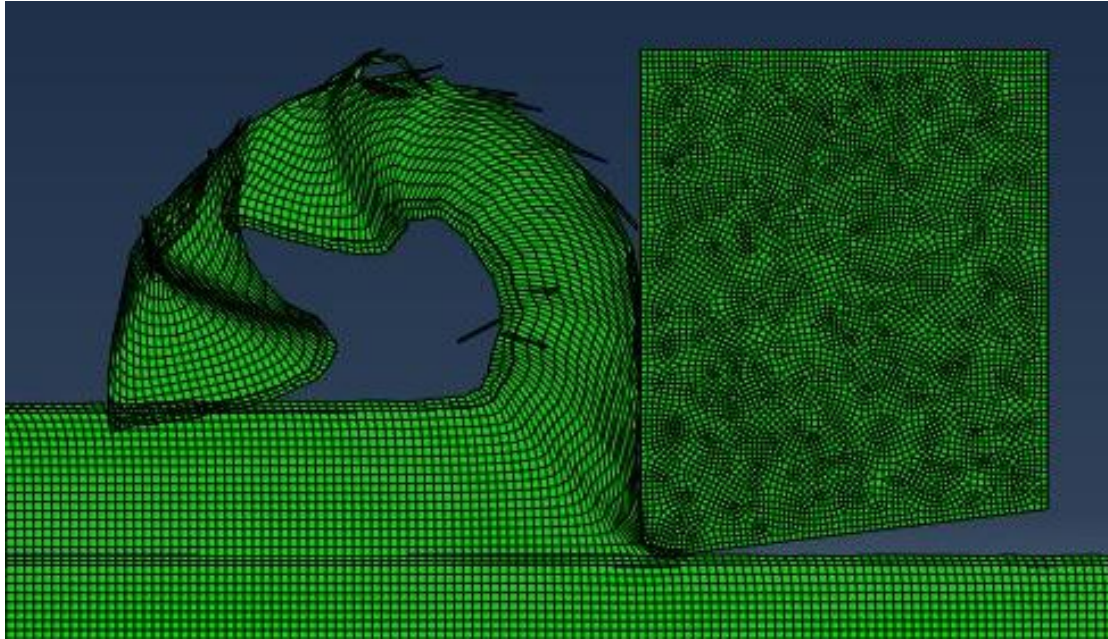


Figura 78 – Continuidad del caso avance = 0,15 mm y $V_c = 60$ m/min.

4.2.3. Pico ($t+$).

En la Tabla 7 se adjuntan los resultados experimentales del valor de pico ($t+$) de la viruta para los diferentes casos estudiados variando los valores de avance y velocidad de corte, proporcionados por la Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, Mercè Seguí Salom [2].

Tabla 7 – Resultados experimentales del valor de pico ($t+$).

PICO [μm]						
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm	Máximo			123	129	120
	Mínimo			107	118	111
	Media			113	123	116
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 μm	Máximo		238	260	218	216
	Mínimo		193	231	184	199
	Media		214	245	199	209
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 μm	Máximo	328	340	351	280	277
	Mínimo	304	299	314	252	231
	Media	316	324	333	267	255

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Resultados numéricos de la simulación realizada del valor de pico (t_+) de la viruta obtenida en la 2ª pasada del mecanizado para los diferentes casos estudiados, variando los valores de avance y velocidad de corte.

Tabla 8 – Resultados numéricos del valor de pico (t_+) de la segunda pasada de la simulación.

PICO [μm]						
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			90	98,4	78,9	76,3
			94,6	91,8	74,1	83,3
			95,6	103	83,3	72,2
	Media		93,41	97,75	78,78	77,25
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 μm			177,43	150,61	142,74	150,48
			183,74	153,10	156,13	139,67
			155,78	167,29	177,43	123,64
	Media		172,32	157,00	158,77	137,93
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 μm			264,98	240,77	216,98	204,69
			228,84	237,03	220,72	204,69
			245,28	253,65	216,98	196,94
	Media		246,37	243,82	218,23	202,11

En la Tabla 9 se adjuntan los porcentajes de error entre los valores experimentales y numéricos medios para su validación.

Tabla 9 - Porcentaje de error entre los valores de pico experimentales y numéricos.

PICO [μm]					
V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			13,50%	35,95%	33,40%
Avance 100 μm		19,48%	35,92%	20,22%	34,01%
Avance 150 μm	19,05%	23,96%	26,78%	18,27%	20,74%

La representación gráfica de estos datos manteniendo constante el avance y variando el valor de la velocidad de corte se adjunta en la Figura 79, la Figura 80 y la Figura 81.

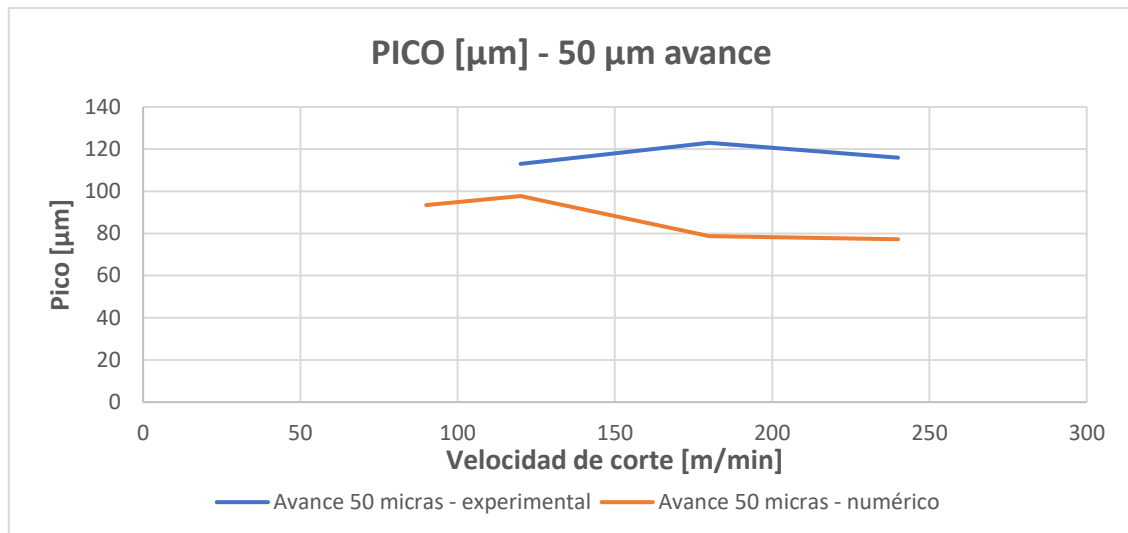


Figura 79 - Gráficas de valor de pico experimental y numérica para un avance de 50 μm .

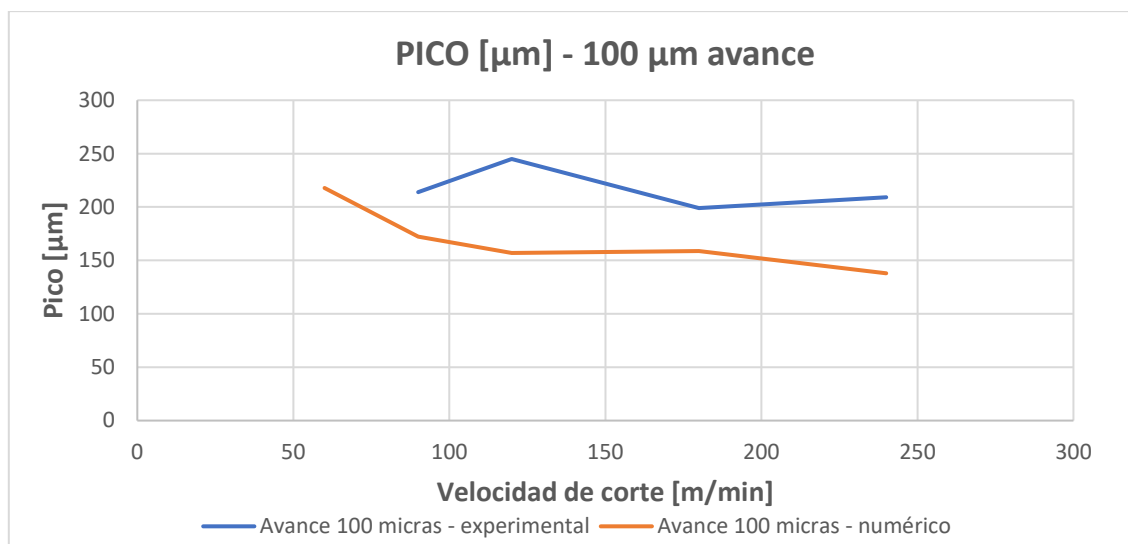


Figura 80 - Gráficas de valor de pico experimental y numérica para un avance de 100 μm .

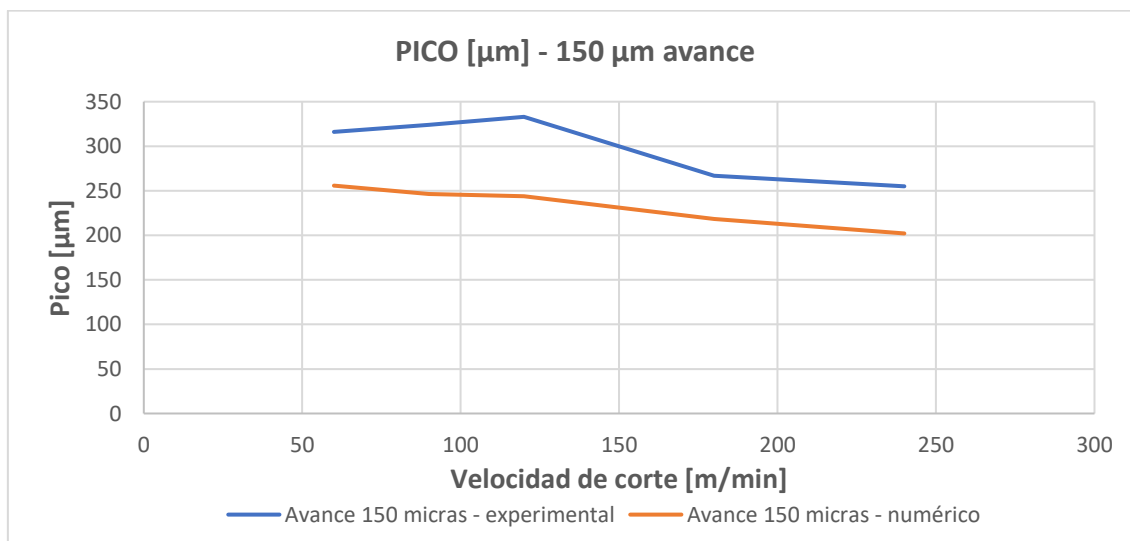


Figura 81 - Gráficas de valor de pico experimental y numérica para un avance de 150 μm .

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, tanto los valores como las tendencias que siguen los datos extraídos de la simulación se asemejan a los valores experimentales. Es por ello por lo que se puede concluir la coherencia de los datos obtenidos para los valores de pico (t_+).

Para los valores obtenidos experimentalmente, manteniendo constante el avance, se observa que la dimensión mayor del espesor de viruta (t_+) disminuye conforme aumenta la velocidad de corte. Esta misma tendencia se mantiene en los valores obtenidos a través del modelo.

Por otro lado, manteniendo la velocidad de corte constante, a medida que aumenta el avance aumenta el espesor de viruta y, por lo tanto, el valor de pico (t_+). Esta tendencia se observa claramente en los gráficos correspondientes tanto a los datos experimentales como a los numéricos.

4.2.4. Valle (t_-).

En este apartado se estudiarán los datos del valle (t_-). A continuación, en la Tabla 10 se adjuntan los datos experimentales del estudio [2] correspondientes a dicho parámetro.

Tabla 10 – Resultados experimentales del valor de valle (t_-).

VALLE [μm]						
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 0,05 μm	Máximo			109	90	86
	Mínimo			101	77	71
	Media			106	82	79
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 0,1 μm	Máximo		144	159	147	160
	Mínimo		96	135	119	140
	Media		115	146	135	150
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 0,15 μm	Máximo	204	179	240	181	161
	Mínimo	163	163	205	167	118
	Media	188	173	221	176	138

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En la Tabla 11 aparecen los resultados de la simulación realizada del valor de valle (t-) de la viruta obtenida en la 2ª pasada del mecanizado para los diferentes casos estudiados, variando los valores de avance y velocidad de corte.

Tabla 11 – Resultados numéricos del valor de valle (t-) de la segunda pasada de la simulación.

VALLE [μm]						
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			80,58	115,01	53,72	44,65
			88,23	82,86	40,71	68,29
			87,80	69,48	62,81	48,40
	Media		85,54	89,12	52,41	53,78
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 μm			115,33	133,31	110,70	103,30
			105,03	115,98	130,33	80,56
			120,84	145,12	95,73	90,06
	Media		113,74	131,47	112,25	91,31
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 μm			113,42	203,60	186,12	142,36
			134,08	156,69	139,59	116,74
			132,62	121,62	168,97	164,52
	Media		126,71	160,64	164,89	141,21

En la Tabla 12 se adjuntan los porcentajes de error entre los valores de valle experimentales y numéricos medios para su validación.

Tabla 12 - Porcentaje de error entre los valores de valle experimentales y numéricos.

VALLE [μm]					
V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			0,16%	0,36%	0,32%
Avance 100 μm		1,1%	9,95%	16,85%	39,13%
Avance 150 μm	1,10%	26,76%	27,31%	6,31%	2,33%

La representación gráfica de estos datos manteniendo constante el avance y variando el valor de la velocidad de corte se adjunta a continuación, en la Figura 82, la Figura 83 y la Figura 84.

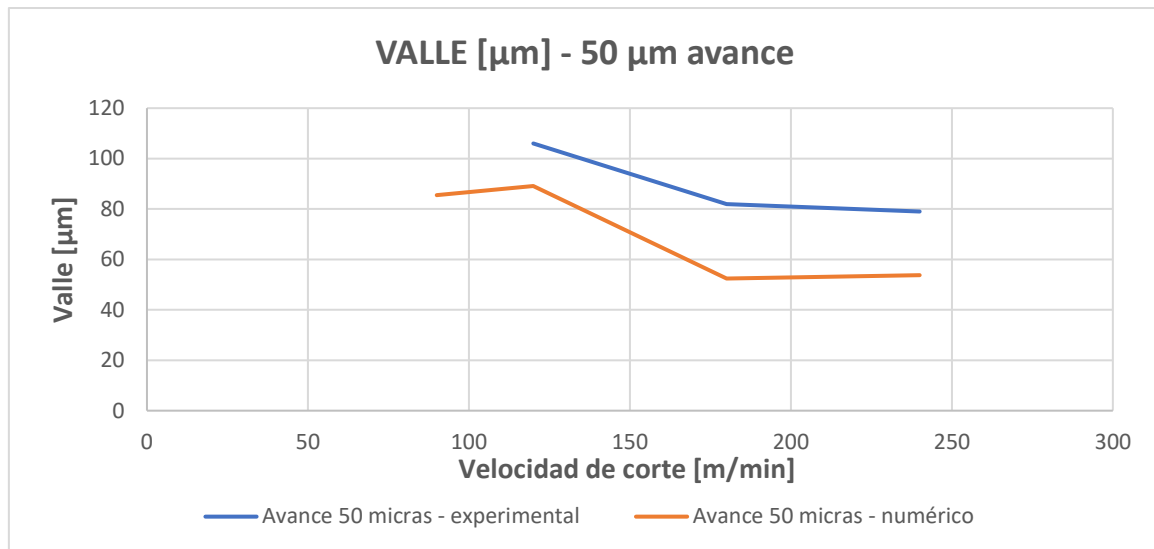


Figura 82 - Gráficas de valor de valle experimental y numérica para un avance de 50 μm .

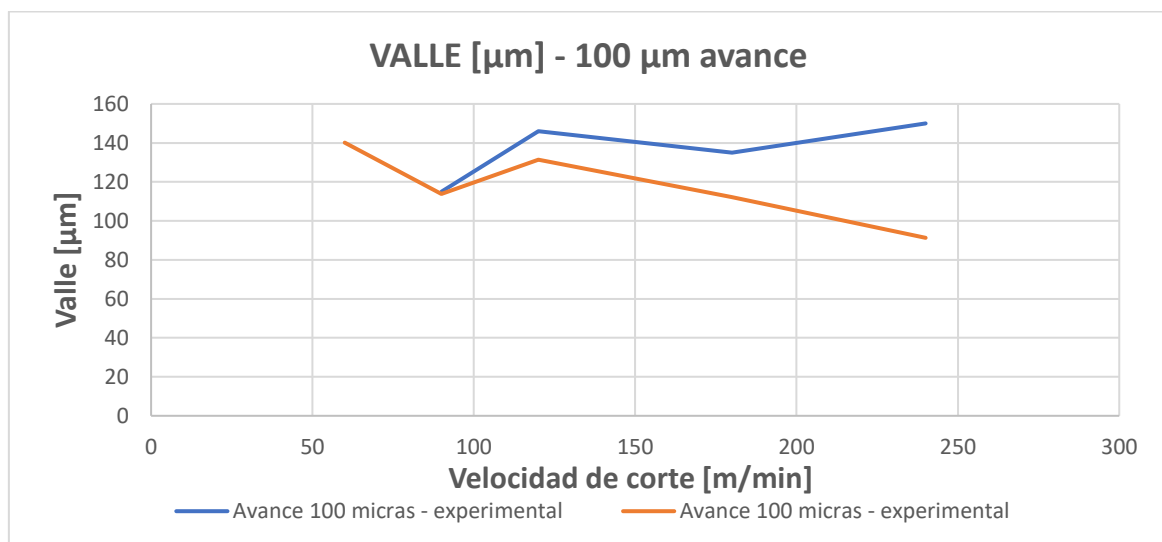


Figura 83 - Gráficas de valor de valle experimental y numérica para un avance de 100 μm .

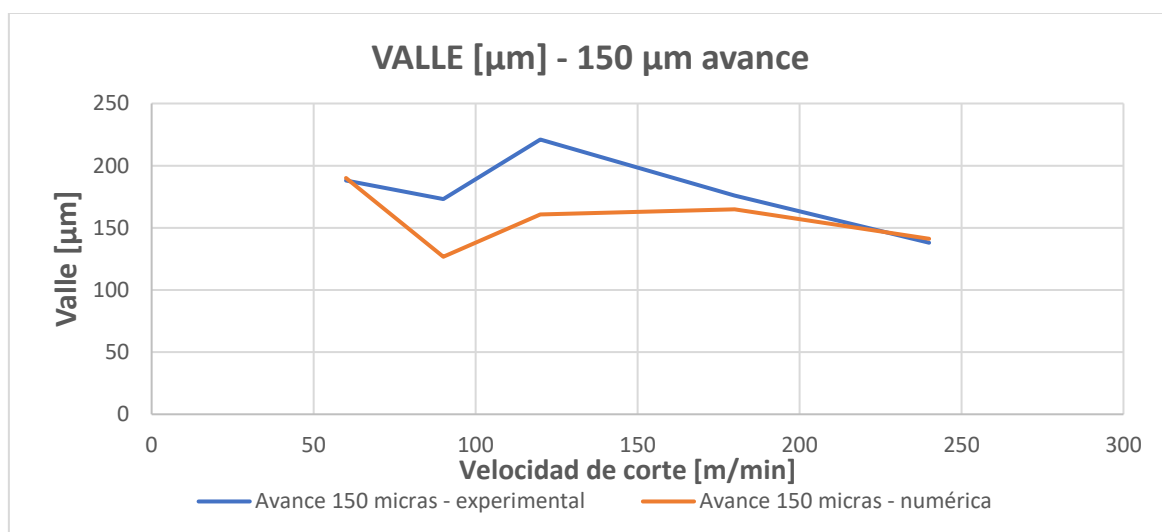


Figura 84 - Gráficas de valor de valle experimental y numérica para un avance de 150 μm .

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los valores obtenidos de valle (t_-), tanto experimentales como numéricos, siguen la misma tendencia que en el caso anterior, ya que este parámetro también caracteriza las dimensiones del espesor de viruta. Es decir, para un avance constante, el valor del valle disminuye conforme aumenta la velocidad de corte. Por otro lado, manteniendo la velocidad de corte, se observa como, a medida que aumenta el avance, aumenta el espesor de viruta y por lo tanto aumentará el valle (t_-), al igual que el valor del pico (t_+).

A su vez, los valores experimentales y numéricos coinciden razonablemente, por lo que podemos afirmar la validez de los datos correspondientes a esta magnitud obtenidos a través del modelo de elementos finitos.

4.2.5. Ancho de segmento (w).

En la Tabla 13, resultados experimentales del valor del ancho de segmento en micrómetros de la viruta para los diferentes casos estudiados variando los valores de avance y velocidad de corte, proporcionados por la Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, Mercè Seguí Salom [2].

Tabla 13 – Resultados experimentales del valor de ancho de segmentos (w).

ANCHO DE SEGMENTO [μm]						
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm	Máximo			53	66	65
	Mínimo			35	46	39
	Media			45	55	50
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 μm	Máximo		137	134	100	77
	Mínimo		91	96	57	51
	Media		114	113	75	65
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 μm	Máximo	162	181	134	139	147
	Mínimo	147	158	107	83	95
	Media	155	169	118	114	125

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Resultados de la simulación realizada del ancho de segmento de la viruta obtenida en la segunda pasada del mecanizado para los diferentes casos estudiados, variando los valores de avance y velocidad de corte.

Tabla 14 – Resultados numéricos del valor de ancho de segmento (w) de la segunda pasada de la simulación.

ANCHO DE SEGMENTO[μm]						
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			97,07	72,20	54,05	63,04
			100,04	87,15	57,05	59,97
			97,07	96,00	66,03	72,20
	Media		98,06	85,12	59,04	65,07
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 μm			120,12	138,66	120,72	127,40
			120,12	120,27	126,27	78,08
			157,19	132,27	120,27	102,81
	Media		132,48	130,40	122,42	102,76
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 μm			189,39	181,04	171,40	126,13
			225,91	153,15	153,15	171,17
			189,18	189,39	162,40	120,06
	Media		201,50	174,53	162,32	139,12

En la Tabla 15 se adjuntan los porcentajes de error entre los valores de valle experimentales y numéricos medios para su validación.

Tabla 15 - Porcentaje de error entre los valores de ancho de segmento experimentales y numéricos.

ANCHO DE SEGMENTO [μm]					
V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			89,152%	7,35%	30,14%
Avance 100 μm		16,21%	15,40%	63,23%	58,10%
Avance 150 μm	65,65%	19,23%	47,91%	42,38%	11,30%

La representación gráfica de estos datos manteniendo constante el avance y variando el valor de la velocidad de corte se adjunta a continuación en las Figuras 85, la Figura 86 y la Figura 87.

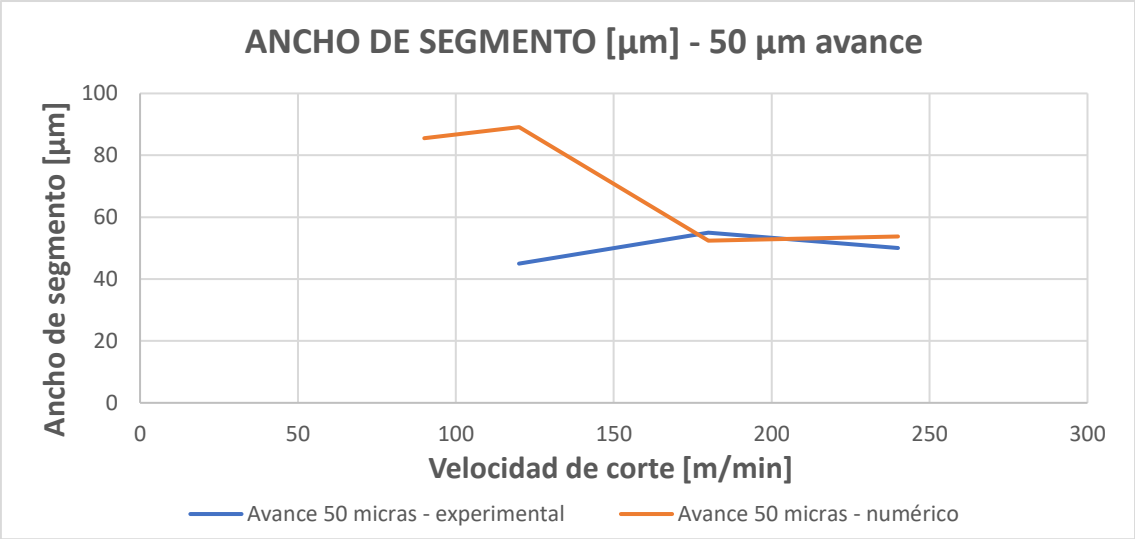


Figura 85 - Gráficas de valor ancho de segmento experimental y numérica para un avance 50 μm .

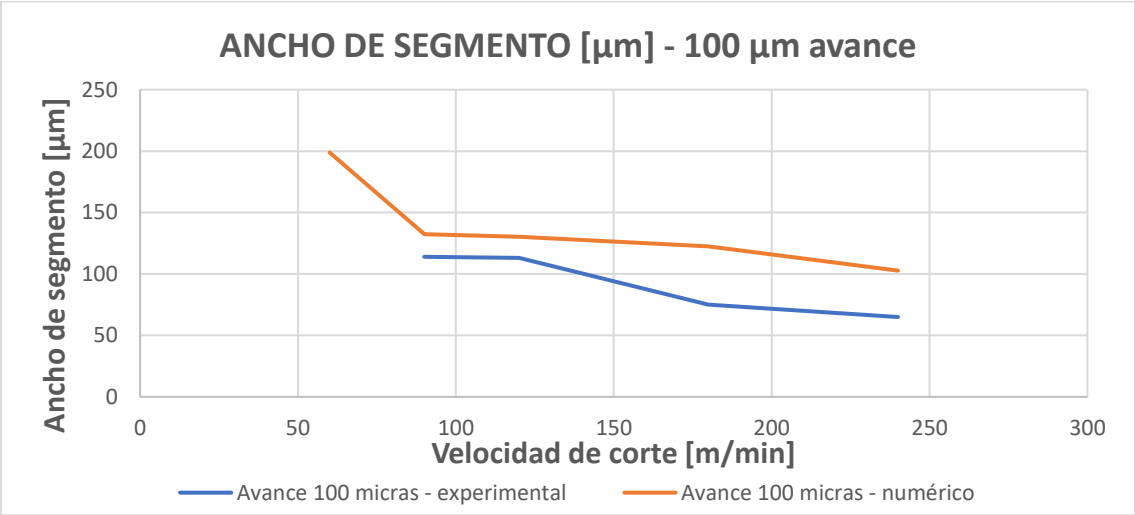


Figura 86 - Gráficas de valor ancho de segmento experimental y numérica para un avance 100 μm .

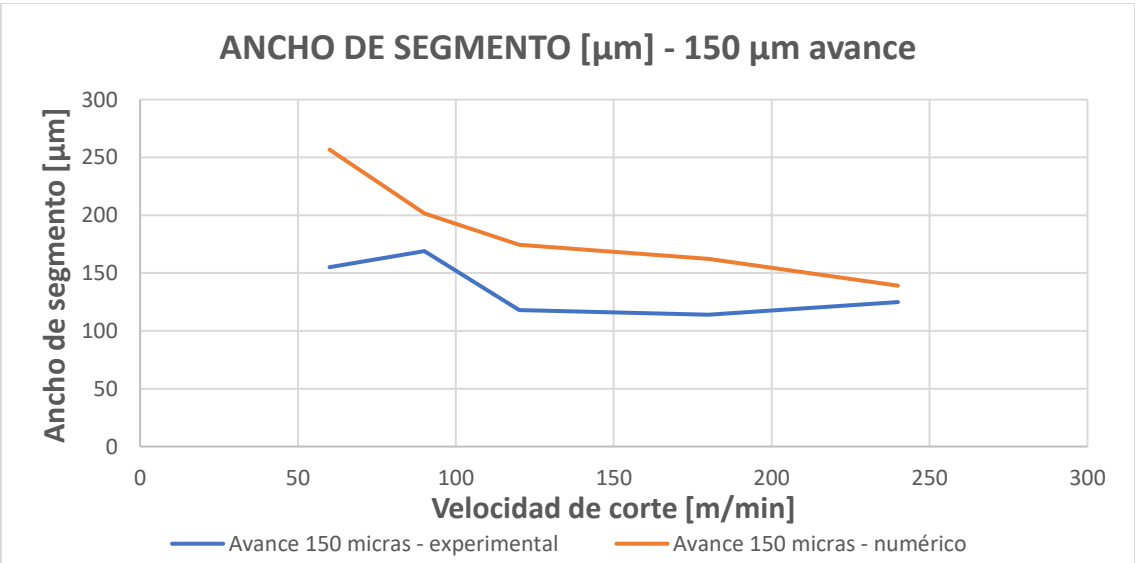


Figura 87 - Gráficas de valor ancho de segmento experimental y numérico para un avance 150 μm .

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Como se ha explicado anteriormente, el ancho de segmento es considerado la distancia medida perpendicularmente entre flancos paralelos de dientes contiguos. Comparando las gráficas anteriores se puede observar que, tanto las magnitudes obtenidas de ancho de segmento (w) como las tendencias que estas siguen, son semejantes entre los datos experimentales proporcionados y los valores obtenidos del modelo numérico.

Con respecto a la tendencia que sigue el valor del ancho de segmento, manteniendo la velocidad de corte constante, este aumentará conforme aumente el avance. Por otro lado, al aumentar la velocidad de corte cambia la morfología de viruta pasando de ser continua a segmentada y, como se puede observar en la gráfica anterior, el ancho de viruta de las serradas irá disminuyendo.

4.2.6. Ángulo de cizalladura (α).

Resultados experimentales del valor del ángulo de cizalladura en micrómetros de la viruta para los diferentes casos estudiados variando los valores de avance y velocidad de corte, proporcionados por la Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, Mercè Seguí Salom [2].

Tabla 16 – Resultados experimentales del valor de ángulo de cizalladura (α).

ÁNGULO DE CIZALLADURA [°]						
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 µm	Máximo	51		60	60	53
	Mínimo	40		45	41	40
	Media	45		50	51	47
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 µm	Máximo	65	63	61	57	59
	Mínimo	49	52	47	45	45
	Media	56	57	54	51	51
	V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 µm	Máximo	61	58	61	62	68
	Mínimo	52	53	47	51	53
	Media	57	56	54	58	60

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En la Tabla 17 se adjuntan los resultados de la simulación realizada del ángulo de cizalladura de la viruta obtenida en la 2ª pasada del mecanizado para los diferentes casos estudiados, variando los valores de avance y velocidad de corte.

Tabla 17 – Resultados numéricos del valor de ángulo de cizalladura (α) de la segunda pasada de la simulación.

ÁNGULO DE CIZALLADURA [°]						
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 μm			69,09	40,99	45,92	65,98
			74,89	42,10	42,43	63,37
			71,38	43,23	32,02	41,85
	Media		71,79	42,11	40,13	57,07
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 100 μm			59,68	58,68	51,28	57,50
			53,17	57,88	33,44	46,36
			52,54	50,23	44,87	44,71
	Media		55,13	55,60	43,20	49,52
	V _c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 150 μm			49,49	42,73	51,35	37,47
			67,54	36,67	46,39	47,30
			46,22	67,60	50,62	39,82
	Media		54,41	49,00	49,45	41,53

En la Tabla 18 se adjuntan los porcentajes de error entre los valores de valle experimentales y numéricos medios para su validación.

Tabla 18 - Porcentaje de error entre los valores de ángulo de cizalladura experimentales y numéricos.

ÁNGULO DE CIZALLADURA [°]					
V_c [m/min]	60	90	120	180	240
Avance 50 µm			15,78%	21,32%	21,42%
Avance 100 µm	6,12%	3,28%	2,95%	15,30%	2,90%
Avance 150 µm	15,33%	2,83%	9,26%	14,74%	30,78%

La representación gráfica de estos datos manteniendo constante el avance y variando el valor de la velocidad de corte se adjunta en la Figura 88, la Figura 89 y la Figura 90.

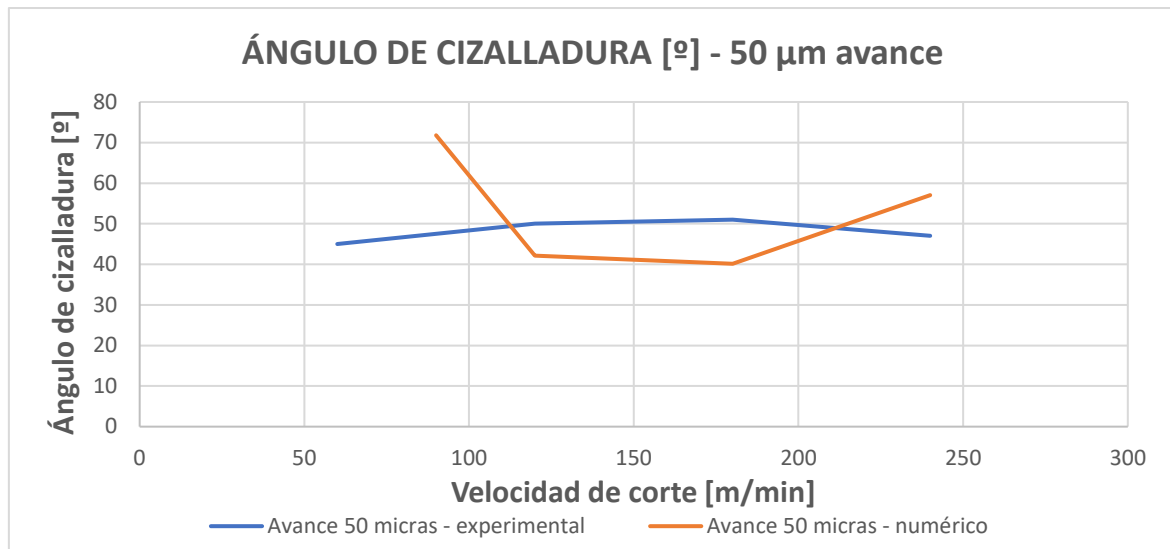


Figura 88 - Gráficas de valor ángulo de cizalladura experimental y numérica para avance 50 μm .

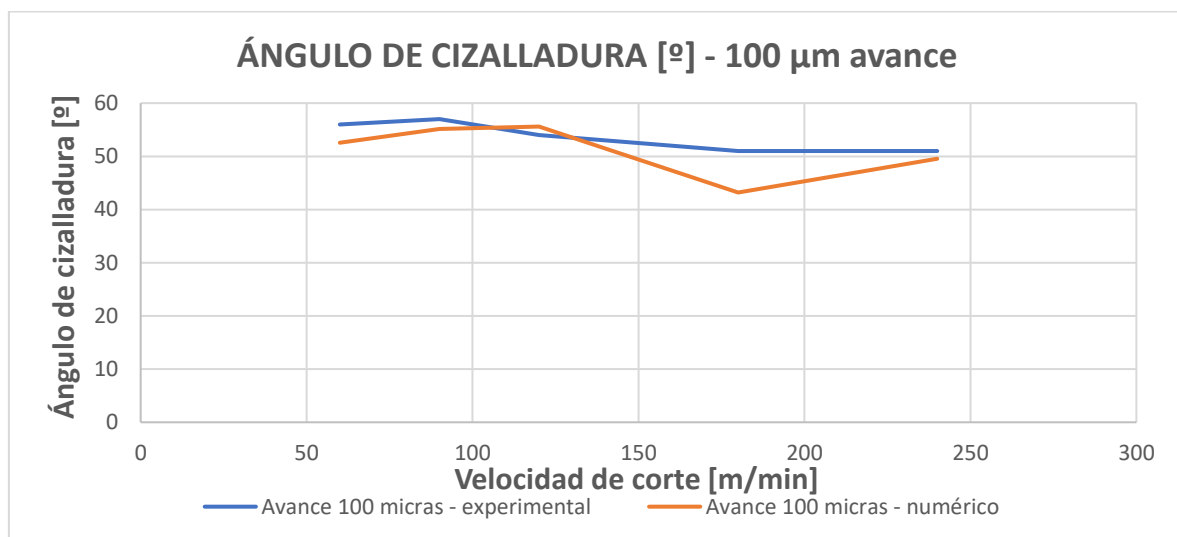


Figura 89 - Gráficas de valor ángulo de cizalladura experimental y numérica para avance 100 μm .

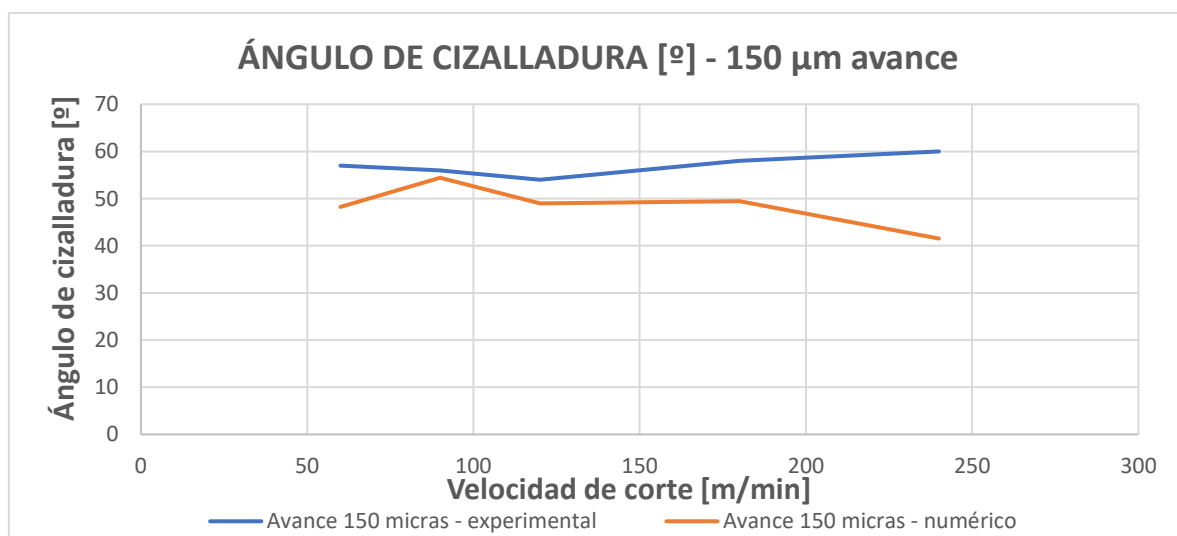


Figura 90 - Gráficas de valor ángulo de cizalladura experimental y numérica para avance 150 μm .

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los valores experimentales del ángulo de cizalladura se encuentran acotados entre 45° y 60° , mientras que los numéricos que provienen de la simulación no superan los 40° inferiormente, ni los 70° superiormente. De esta manera, se puede concluir que los datos de la simulación son coherentes y razonablemente aceptables.

El porcentaje de error de las diferentes variables morfológicas analizadas entre los resultados experimentales y numéricos se supone suficiente como para validar el modelo.

Cabe destacar que las mediciones obtenidas experimentalmente de los valores de pico, valle y ancho de segmento para los siguientes ensayos fueron descartadas. Es por ello por lo que no contamos con estos datos para el completo análisis del modelo de elementos finitos. Sin embargo, los valores para el ángulo de cizalladura sí pudieron ser obtenidos y, por lo tanto, han sido usados para la validación del caso.

- Para el avance 0,05 mm y velocidades de corte 60 m/min y 90 m/min.
- Para el avance 0,10 mm y velocidad de corte 60 m/min.

El motivo de descartar los ensayos correspondientes a estos parámetros de corte fue que no se distinguía con claridad una viruta serrada, por lo que fue imposible medir estos parámetros.

Esta homogeneidad en la viruta también se muestra en las simulaciones obtenidas de estos mismos casos. Aunque los parámetros estudiados no pueden ser obtenidos y, por lo tanto, comparados cuantitativamente para la posterior validación del modelo, esta coincidencia también es favorable para una validación cualitativa.

Tras la comparación anterior con los datos experimentales proporcionados de los cuatro parámetros morfológicos principales, podemos concluir la validez del modelo de elementos finitos implementado.

CAPÍTULO V: ORGANIZACIÓN Y PRESUPUESTO.

5.1. Organización.

Este proyecto se divide en 5 grandes bloques. El primero de ellos engloba la planificación e investigación inicial sobre el proyecto. A continuación, se llevaron a cabo la ejecución de los casos estudiados y la extracción de datos necesarios. El tercer bloque corresponde al análisis de estos datos, el cual puede subdividirse en el estudio de la influencia de los parámetros de corte en la morfología de viruta y la validación del modelo numérico de elementos finitos. Una vez realizados dichos análisis y sus correspondientes conclusiones, se realizó finalmente la memoria del proyecto. En la Tabla 19 se adjunta el tiempo aproximado invertido en cada una de las tareas que componen el desarrollo del proyecto.

Tabla 19 - Relación entre tiempo invertido y tareas del proyecto.

TAREA	HORAS TOTALES
Planificación	3
Investigación y búsqueda de información	12
Ejecución y extracción de datos	90
Análisis de resultados	100
Conclusiones	10
Redacción de la memoria	120
TOTAL	335

5.2. Presupuesto del proyecto.

A continuación, se muestra una estimación de los costes asociados a la realización de este proyecto. Para ello, se han estimado los costes de personal y costes de material.

CAPÍTULO V: ORGANIZACIÓN Y PRESUPUESTO.

- **Costes de personal:** en este apartado se incluye el tiempo invertido por el autor del proyecto, estimado en 335 horas con un valor de 25 €/hora.
- **Costes de material:** en este apartado se incluye únicamente el coste del equipo informático utilizado, así como las licencias de los programas empleados. Esto es debido a que este proyecto se centra en el análisis de un modelo numérico. Los programas empleados fueron Microsoft Office 2017 y Abaqus 6.14.

El cálculo de los costes de amortización de los materiales se ha estimado a través de la siguiente ecuación (4).

$$\frac{n^{\circ} \text{ meses de utilización}}{n^{\circ} \text{ meses periodo de amortización}} \cdot \% \text{ uso} \cdot \text{coste material} \quad (4)$$

Tabla 20 - Costes de personal

Costes de personal				
Personal	Categoría	Dedicación (h)	Coste (€/h)	Coste total (€)
Marta Potti Huerta	Estudiante de Ingeniería	335	25	8375
Subtotal				8375

Tabla 21 - Costes de material

Costes de material					
Material	Utilización (meses)	Periodo de amortización (meses)	Uso dedicado (%)	Coste (€)	Coste total (€)
Ordenador personal	9	120	50	1100	41,25
Licencia Microsoft Office	9	12	90	99	66,83
Licencia Abaqus 6.14	7	12	100	21950	12804,17
Subtotal					12912,25

$$\text{Coste total} = \text{Costes de personal} + \text{Costes de material} = 21287,25 \text{ €}$$

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.

6.1. Conclusiones.

Este proyecto centra su trabajo en dos objetivos principales. El primero de ellos es el estudio de la influencia sobre la morfología de viruta de los parámetros de corte velocidad de corte y avance, así como de la influencia de la primera pasada sobre el mecanizado. El segundo objetivo es la validación del modelo numérico implementado en Abaqus/Explicit, la cual se llevó a cabo mediante la comparación de la morfología de viruta obtenida de los ensayos experimentales de la bibliografía [2]. Para ello, se realizó la medición de los diferentes parámetros geométricos que caracterizan la morfología de viruta (pico, valle, ancho de segmento y ángulo de cizalladura).

A través del primer análisis de los parámetros de corte, se observó que los datos obtenidos durante la primera pasada a través de nuestro modelo de elementos finitos no representan un modelo de mecanizado real, mientras que la segunda pasada sí se aproxima a la realidad. Es por ello por lo que el análisis posterior del modelo numérico se realizó a partir de los datos de la segunda pasada.

El primer objetivo principal de este proyecto es el análisis de la influencia de la velocidad de corte, el avance y la segunda pasada en la morfología de viruta.

- Se ha llevado a cabo un estudio de la morfología de viruta en función de la velocidad de corte del que se concluye que, al aumentar la velocidad de corte del mecanizado, la temperatura en la zona de cizalladura aumentará, produciendo un ablandamiento térmico en dicha zona del material. Además, al aumentar la velocidad de corte empleada, aumentará la velocidad de deformación plástica, obteniendo un material más viscoso. Estas dos características explican la transformación de la morfología de viruta de continua a serrada. Por otro lado, al aumentar la velocidad de corte la discontinuidad de la viruta aumentará.
- También se ha llevado a cabo un estudio de la influencia del avance en la morfología de viruta en la que se concluye que, al aumentar este parámetro, la

viruta pasará de una morfología continua a serrada. Al igual que la velocidad de corte, el aumento del avance dará lugar a un aumento de la temperatura y de la velocidad de deformación plástica. Además, cuanto menor sea el valor del avance, mayor discontinuidad se observará en la viruta.

- La morfología obtenida durante la 1ª y la 2ª pasada de la simulación presenta grandes diferencias. El calentamiento del material producido durante la 1ª pasada provoca un ablandamiento térmico que afectará a la morfología obtenida durante la 2ª pasada. Es por esto por lo que durante la 1ª pasada obtenemos una morfología continua, mientras que durante la 2ª pasada predomina la morfología serrada.

Tras la comparación realizada en el segundo bloque del proyecto con los datos experimentales proporcionados de los cuatro parámetros morfológicos principales, podemos concluir la validez del modelo de elementos finitos implementado.

6.2. Líneas de trabajo futuro.

Una vez validado e implementado el modelo numérico de elementos finitos, se nos ofrece una amplia posibilidad de trabajos basados en la utilización y ampliación de este modelo. A continuación, se enumeran distintos ejemplos de trabajos relacionados con este proyecto.

- Ampliación del número de pasadas simuladas y análisis de la influencia sobre los resultados obtenidos.
- Estudio del comportamiento de distintos materiales de la pieza a mecanizar sometidos a este proceso.
- Desarrollar el análisis empleando otras geometrías de herramienta.
- Realizar un modelo tridimensional ampliando los valores de los parámetros de corte estudiados y analizar la influencia de otros parámetros de corte como la profundidad.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.

- [1] «Special Metals,» Septiembre 2007. [En línea]. Available:
http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf.
[Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [2] M. Seguí Salom, *Morfología de la viruta obtenida durante el torneado de Inconel 718*, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [3] A. Kortabarria, «Multi revolution finite element model to predict machining induced,» *Procedia CIRP* 8, pp. 111-116, 2013.
- [4] «GoodFellow50,» [En línea]. Available: <http://www.goodfellow.com/S/Inconel-alloy-718-Aleacion-Resistente-al-Calor.html>. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [5] L. R. Álvarez Fernández, *Análisis por el método de elementos finitos de modelo simplificado de corte en aleaciones ligeras de interés aeroespacial*, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [6] J. J. Martínez Mercado, *Análisis termomecánico mediante elementos finitos de procesos de corte ortogonal de Inconel 718*, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [7] D. García Balsa, *Simulación del proceso de mecanizado por torno a alta velocidad de la aleación Inconel 718*, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [8] N. Feito Sánchez, *Análisis numérico de corte ortogonal mediante modelos de elementos finitos con y sin límite de daño crítico del material.*, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [9] H. Bil, «2D FE modelling of machining: A comparison with different approaches with experiments.,» de *VIII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2005.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.

- [10] H. Ding, «Thermal and mechanical modeling analysis og laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys,» *Journal of Processing Technology*, vol. 212, nº 3, pp. 601-613, 2012.
- [11] «Alloy Wire International,» [En línea]. Available: http://www.alloywire.com/spanish/inconel_alloy_718.html. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [12] «Mega Mex "Metales Especiales Bajo Demanda",» [En línea]. Available: <http://megamex.com/span/inconel.htm>. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [13] «SlideShare: Sistemas de deslizamiento en diferentes estructuras cristalinas.,» 2015. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/carlosarreola395/93-sistemas-de-deslizamiento-en-diferentes-cristales>. [Último acceso: 10 Mayo 2017].
- [14] J. Zambonino, «SlideShare: Formación de viruta en procesos de maquinado CNC.,» 19 Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/xXollie/formacion-de-viruta>. [Último acceso: 11 Mayo 2017].
- [15] R. de Blas Luna, *Análisis paramétrico del corte ortogonal de materiales compuestos mediante modelización numérica*, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [16] J. Díaz Álvarez, *Análisis numérico y experimental del desgaste de herramienta e integridad superficial en los procesos de torneado de Inconel 718*, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [17] N. d. C. Marín Calvo, *Análisis termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros.*, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [18] C. Rodríguez Villanueva, *Análisis de triaxialidad y del parámetro LODE en simulación numérica de placas metálicas sometidas a cargas de impacto.*, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [19] R. Ruiz-Castro Alcobendas, *Estudio paramétrico del proceso de corte ortogonal mediante el método de los elementos finitos: estudio de la influencia de los*

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.

parámetros de la ley constitutiva de Johnson-Cook en los resultados globales y locales y de la cinemática de la viruta., Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

- [20] T. R. N., «Influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico de los metales.,» [En línea]. Available: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Temperatura_5185.pdf. [Último acceso: 30 Agosto 2017].
- [21] A. Thomas, *Estudio del comportamiento en caliente del Inconel 718.*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, 2005.
- [22] B. E. Keyan Wang, *Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process.*, Hamilton Ontario: McMaster University, March, 2016.
- [23] M. Putz, «Heat Flux in Cutting: Importance, Simulation and Validation.,» *Procedia CIRP* 31, pp. 334 - 339, 2015.
- [24] P. J. Arrazola, «Finite element modeling of chip formation process with Abaqus/Explicit,» de *VIII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2005.
- [25] N. Abukhshim, «Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining.,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, nº 46, pp. 782-800, 2006.
- [26] M. Lévi, «Scribd: Conductividad térmica y tensiones residuales,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/326920502/Conductividad-Termica-y-Tensiones-Residuales>. [Último acceso: 1 Septiembre 2017].